8.19

Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 8.19

Weltformel ohne Quantengravitation

Sind Quantenmechanik und Schwerkraft unvereinbar?

VENUS Der Exoplanet nebenan

SUPERVULKAN Unter Chile braut sich etwas zusammen

KELTEN Krieger mit filigranem Goldschmuck

8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN
4 194058 408904 08


Spektrum der Wissenschaft
KOMPAKT
Spektrum der Wissenschaft
KOMPAKT
04.19
SCHMERZ
Neue Wege aus der Pein
Migräne | Behandlung mit Antikörpern
Psychotrauma | Schäden der Vergangenheit
Virtual Reality | Hilfe bei chronischen Beschwerden
Jetzt
für nur € 5,90
bei Ihrem
Zeitschriften-
händler!
Diese und mehr als 200 weitere Ausgaben unter :
www.spektrum.de/kompakt
ROYALFIVE / GETTY IMAGES / ISTOCK (SYMBOLBILD MIT FOTOMODELL)



EDITORIAL
WIDER DIE INTUITION

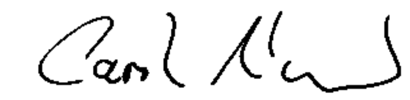
Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Als ich in den 1990er Jahren Physik studierte, galt die Angelegenheit als ausgemacht. Unisono prognostizierten unsere Professoren, dass alle vier bekannten Fundamentalkräfte der Natur – die elektromagnetische, die starke und die schwache Kernkraft sowie die Gravitation – in einer übergreifenden Theorie zusammengefasst werden könnten. Bereits in der Einführungsvorlesung wurden uns zwei Gründe für diese Annahme kredenzt: Zum einen verlange dies schlicht die »physikalische Intuition«. Und zum anderen habe man auf dem Weg der Vereinigung ja schon fast alles erreicht; allein die Schwerkraft ziere sich noch.

Tatsächlich ist die Physik des 20. Jahrhunderts eine Erfolgsgeschichte der Vereinheitlichung. Nachdem James Clerk Maxwell bereits zuvor Magnetismus und Elektrizität als zwei Phänomene gemeinsamen Ursprungs verstanden hatte, entwickelten Sheldon Lee Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam Ende der 1960er Jahre ein Modell, das die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung elegant zur »elektroschwachen Kraft« zusammenschließt. Diese wiederum konnte in den nachfolgenden Jahrzehnten mit der starken Kernkraft zum umjubelten und experimentell sehr gut erhärteten Standardmodell der Elementarteilchen erweitert werden. Allein die vierte der grundlegenden Wechselwirkungen, die Gravitation – für sich genommen durch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie beschrieben –, war noch außen vor. Eine ganze Physikergeneration später ist das weiterhin der Fall. Alle Versuche, eine ultimative »Weltformel« aufzustellen, scheiterten trotz immensen Aufwands krachend. Ist die Schwerkraft womöglich gar nicht auf Spur zu bringen? Entpuppt sich die »physikalische Intuition« am Ende als Wunschdenken?

Noch muss niemand ein solches Urteil fällen. Vielleicht haben die Theoretiker, von den Erfolgen der Vergangenheit beflügelt, schlicht den falschen Weg eingeschlagen, als sie versuchten, auch die Gravitation zu quantisieren, nachdem dies bei sämtlichen anderen Grundkräften geglückt war. Unser Autor Antoine Tilloy verfolgt daher einen anderen Ansatz. Der Forscher vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München stellt ab S. 12 eine neue Theorie vor, die Relativitätstheorie und Quantenphysik so miteinander verbindet, dass die Schwerkraft ihren klassischen Charakter behält.

Eine inspirierende Lektüre wünscht
Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 2.19 liefert einen Überblick über die faszinierende Welt der mittelalterlichen Medizin.

IN DIESER AUSGABE



ANTOINE TILLOY

Der Physiker interessiert sich für alle Aspekte der Quantenphysik. Ab S. 12 erklärt er, wie eine ihrer Deutungen einen neuen Ansatz für die »Weltformel« liefern könnte.

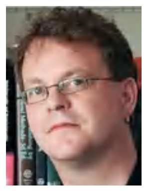
LISA QUINONES





DARBY DYAR, SUZANNE SMREKAR, STEPHEN KANE

Die Astrophysiker suchen nach Faktoren, die Leben auf Planeten begünstigen, und glauben, die Venus könnte Antworten liefern (S. 52).

BARBARA ARMBRUSTER, ROLAND SCHWAB

Warum trugen die als brutal verschrienen Keltenkrieger filigranen Goldschmuck? Eine Goldschmiedin und Archäologin sowie ein Archäometallurg sind dem Rätsel auf der Spur (S. 72).

INHALT

TITELBILD:
SHULZ / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SHULZ / GETTY IMAGES / ISTOCK



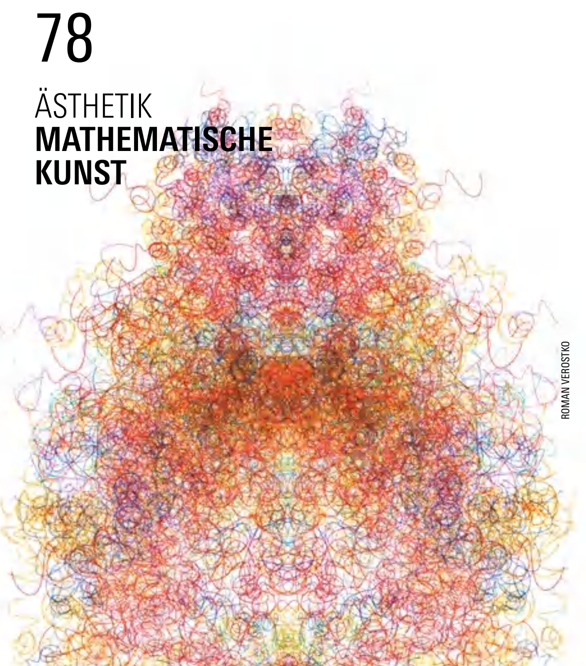
JAMES GURNEY / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2018



IMAGINIMA / GETTY IMAGES / ISTOCK



BARBARA ARMBRUSTER / MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE SAARBRÜCKEN



ROMAN VEROSTKO



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



EIN KUNSTWERK AUS RÖNTGENSTRAHLUNG

Eigentlich soll der Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) an Bord der Internationalen Raumstation die Röntgenstrahlung weit entfernter Neutronensterne auffangen. Da sich das Messinstrument jedoch zusammen mit der ISS binnen 93 Minuten einmal um die Erde bewegt, kann es solche Quellen immer nur für kurze Zeit im Blick behalten – anschließend müssen die Forscher NICER in Richtung eines anderen Ziels schwenken. Dabei zeichnet das Gerät weiterhin Daten auf, wodurch Himmelspanoramen wie dieses entstehen. Es basiert auf Messungen aus 22 Monaten und zeigt einerseits mehrere klar identifizierbare Röntgenquellen am Firmament. Links oben ist beispielsweise der so genannte Cygnusbogen als heller Punkt zu sehen, der als Überrest einer

NASA / NICER (SVS.GSFC.NASA.GOV/13214)

Supernova große Mengen Strahlung abgibt. Markant ist auch der Pulsar PSR J1231-1411 links der Bildmitte – bei ihm handelt es sich um einen rasant rotierenden Neutronenstern.

Die geschwungenen Bögen stellen hingegen die Wege dar, auf denen das eng fokussierte Sichtfeld des Detektors von Quelle zu Quelle gewandert ist. Dass NICER auch hier ausschlägt, liegt entweder an Röntgenstrahlen, die abseits der auffälligen Regionen auf den Weg geschickt wurden, oder an versprengten kosmischen Teilchen, die den Detektor treffen. Bahnen, die auf dem Bild besonders hell sind, hat das Instrument oft abgefahren – oder es verbirgt sich in ihrer Nähe eine noch nicht katalogisierte Strahlungsquelle.

NASA-Mitteilung, Mai 2019



TECHNIK
NEUES SYSTEM FÜR MASSEINHEITEN

Seit dem 20. Mai haben mehrere wichtige Maßeinheiten eine neue Basis. Das Kilogramm, das Ampere, das Kelvin und das Mol sind nun durch Naturkonstanten definiert. Die genauen Werte der vier Größen sind damit für alle Zeiten festgezurrt, sie lassen sich künftig durch Präzisionsmessungen in gut ausgestatteten Laboren ermitteln.

Aus Sicht von Metrologen ist beides ein großer Fortschritt: Insbesondere das Kilogramm hat den Messexperten in der Vergangenheit Sorgen bereitet, da sein exakter Wert von der Masse eines 130 Jahre alten Platin-Iridium-Zylinders in einem Pariser Tresor abhing. Dieses Urkilogramm schien im Lauf der Zeit langsam an Masse zu verlieren (siehe **Spektrum** Juni 2017, S. 46).

Weltweit arbeiteten Metrologen jahrelang an einer Neudefinition, die vier der sieben grundlegenden Maßeinheiten des SI-Einheitensystems umfassen sollte. Meter, Sekunde und Candela lassen sich bereits seit Jahrzehnten aus Naturkonstanten ableiten. So ist es von nun an auch beim Kilogramm: Sein exakter Wert ergibt sich in Zukunft aus dem planckschen Wirkungsquantum. Es verknüpft die Energie einer Lichtwelle mit ihrer Frequenz und hat stets denselben Wert.

Über seine Maßeinheit (kg m²/s) steht es in eindeutiger Beziehung zu Kilogramm, Meter und Sekunde. Wissenschaftler haben daher in den vergangenen Jahren den exakten Wert des Wirkungsquantums mit verschiedenen Methoden äußerst präzise bestimmt. Da dabei jeweils die Masse des Urkilogramms einfloss, kann das Pariser Artefakt jetzt in Ruhestand gehen: Künftig lässt sich der Wert der Kilogrammmasse aus der planckschen Naturkonstante ableiten.

Ähnliche Definitionen gelten in Zukunft für Ampere, Kelvin und Mol. Das Ampere ist von jetzt an durch die elektrische Ladung eines Elektrons festgelegt, das Kelvin unter anderem durch die so genannte Boltzmann-Konstante. Und das Mol lässt sich über die Avogadro-Konstante bestimmen, welche sich aus der Teilchenzahl pro Stoffmenge ableitet.

Mitteilung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Mai 2019



Metrologen können aus Einkristallen hochwertige Siliziumkugeln ziehen, deren Masse exakt ein Kilogramm beträgt – in Zukunft ein wichtiges Mittel zum Massenvergleich.

ARCHÄOLOGIE
DIE LUFTVERSCHMUTZUNG DER ALTEN RÖMER

In der Antike scheinen die Römer Blei in nahezu industriellem Maßstab verarbeitet zu haben, berichtet ein Team um Susanne Preunkert von der Universität Grenoble. Es hat einen Eisbohrkern vom Col du Dome am Mont-Blanc-Massiv untersucht, dessen älteste Schichten 5000 Jahre alt sind. Mit Hilfe der Radiokarbonmethode, welche das Alter einer Schicht verrät, konnten die Forscher ermitteln, wie viel Blei in bestimmten Jahren in der Luft schwebte.

Das Schwermetall wird bei der Gewinnung und dem Schmelzen von Bleierzen freigesetzt. Es gilt als potentes Umweltgift und ist bereits in geringen Konzentrationen für den menschlichen Körper schädlich. Weil es vergleichsweise einfach zu verarbeiten ist, gewannen es die Römer in Minen und setzten es insbesondere für Wasserleitungen ein.

Bohrkerne aus Grönland deuten schon länger an, dass unsere Vorfahren damit die Luft verpesteten. Nun konnten die Wissenschaftler um Preunkert das Ausmaß der Belastung genauer als bisher bestimmen. Demnach stieg die Bleikonzentration in der Luft über den französischen Alpen zwischen 350 v. Chr. und 175 n. Chr. vorübergehend auf das Zehnfache des natürlichen Werts an.

Die Forscher glauben dabei zwei Phasen besonders hoher Kontamination ausmachen zu können: Während des Aufblühens der römischen Republik in der Zeit um 250 v. Chr. und ab 120 n. Chr., als sich das römische Kaiserreich auf den europäischen Kontinent ausdehnte.

In den Bürgerkriegswirren von 130 bis 30 v. Chr. gelangte hingegen deutlich weniger Blei in die Luft, ebenso wie nach dem Niedergang des römischen Imperiums. Übertroffen wurden diese Werte erst wieder in den 1950er bis 1980er Jahren: Durch bleihaltiges Benzin stieg die Bleikonzentration auf Werte, die 100-fach über dem natürlichen Niveau lagen.

Geophysical Research Letters 10.1029/2019GL082641, 2019

UMWELT
DOPPELSCHLAG GEGEN BIENEN

Kaum ein Imker, der nicht ständig gegen die Varroamilbe ankämpft. Ohne eine Behandlung gegen den eingeschleppten Parasiten und die von ihm übertragenen Viren haben Bienen zuweilen schlechte Überlebenschancen. Doch selbst mit Varroaabwehr sterben manchen Honigproduzenten jedes Jahr überdurchschnittlich viele Völker weg. Über die Ursachen diskutieren Experten seit Langem.

Nun argumentieren Biologen um Lars Straub von der Universität Bern, dass eine Art Doppelschlag den Bienen zu schaffen macht: Der Parasitenbefall werde besonders dann zu einer Gefahr, wenn die Tiere gleichzeitig Neonikotinoiden ausgesetzt sind. Bei ihnen handelt es sich um weit verbreitete Pflanzenschutzmittel, die Ernten oder Saatgut vor Insektenfraß schützen sollen. Einige der Substanzen sind inzwischen wegen ihrer Umweltgefahr stark reglementiert.

Vermutlich nehmen Honigbienen einige der Stoffe jedoch nach wie vor auf und tragen sie in ihre Stöcke. Die Gruppe um Straub hat nun in einem Experiment gezielt nach einem Kombinationseffekt von Varroamilbe und Neonikotinoiden gesucht. Demnach stellte eine Belastung durch die Insektengifte zunächst noch kein Problem für das Überleben einer Kolonie dar. Erst wenn die Bienen zusätzlich noch von den Parasiten befallen waren, zeigten sich Anzeichen für Krankheit.

Vor allem den im Herbst schlüpfenden Winterbienen scheint die Kombination zu schaden. Eigentlich sollen diese größeren und langlebigen Tiere die Kolonie durch den Winter bringen. Im Experiment der Schweizer Wissenschaftler waren sie jedoch kleiner als normal, zudem starben viele von ihnen früher als unbelastete Bienen aus einer Kontrollgruppe – der Effekt der Neonikotinoide zeigte sich hier erst Monate nach der Aufnahme.

Dass sich die beiden Stressfaktoren in ihrer schädlichen Wirkung gegenseitig verstärken, vermuten Experten schon länger. Allerdings habe bislang ein experimenteller Nachweis gefehlt, so die Forscher um Straub. Durch welchen Mechanismus die kombinierte Wirkung zu Stande kommt, ist noch offen. Möglicherweise gelingt es varroabefallenen Bienen nicht mehr so gut, Fremdstoffe unschädlich zu machen.

Scientific Reports 10.1038/s41598-019-44207-1, 2019



Offenbar macht Bienenvölkern die Kombination aus Insektiziden und Parasiten zu schaffen.

BIOPHYSIK
KRANKENHAUSKEIM REGISTRIERT STRÖMUNGEN

Wenn Luft über unsere Haut streicht, können wir zwischen einer leichten Brise und einem kräftigen Wind unterscheiden. Dabei spüren wir allerdings nicht die Geschwindigkeit der Luftteilchen, sondern die Kraft, die sie auf uns ausüben. Zumindest eine Bakterienart scheint dagegen Strömung anders wahrzunehmen, wie ein Forscherteam um Zemer Gitai von der Princeton University entdeckt hat: Das Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* reagiert auf die Schergeschwindigkeit vorbeiströmender Flüssigkeiten, also auf das hier herrschende Geschwindigkeitsgefälle. Dieses neu entdeckte Phänomen bezeichnen die Wissenschaftler als »Rheosensing« (griechisch »rheos« = Fluss oder Strom).

In ihrem Versuch haben die Forscher in unterschiedlichen Stellen des Bakteriengenoms die Bauanleitung für ein fluoreszierendes Protein als Marker für Genaktivität eingefügt. Anschließend hefteten sie die Mikroorganismen an die Wände einer flüssigkeitsdurchströmten Kammer. Bald darauf schalteten sich bestimmte Gene ein: Je höher die Schergeschwindigkeit in der Kammer, desto heller leuchteten die Bakterien.

Die Schwergeschwindigkeit gibt den Geschwindigkeitsunterschied zwischen benachbarten Flüssigkeitsschichten an und wird in der distanzlosen Einheit »pro Sekunde« angegeben. Im Modellsystem der Forscher reagierte *Pseudomonas aeruginosa* auf Scherraten zwischen 40 und 400 pro Sekunde – in diesem Bereich liegen auch unsere Blutgefäße. Mit welchem Sensor das Bakterium diese Eigenschaft der Umgebungsflüssigkeit erfasst, ist aber noch unklar.

Vielleicht lasse sich das Rheosensing bei der Entwicklung neuer Antibiotika ausnutzen, spekulieren die Forscher. Denn zu wissen, wie schnell eine Flüssigkeit strömt, hilft dem in Blutgefäßen und dem Harntrakt vorkommenden *Pseudomonas aeruginosa* wahrscheinlich, sich an seinen Lebensraum anzupassen – und trägt so seinen Teil zur Verbreitung dieses Erregers bei, der als hartnäckiger Krankenhauskeim gilt.

Nature Microbiology 10.1038/s41564-019-0455-0, 2019

MATHEMATIK
ENTDECKUNG DANK »BIG BANG THEORY«

Die 73. Folge der US-Sitcom »The Big Bang Theory« war für Mathematiker eine ganz besondere: Der geniale, wenig lebenstaugliche Physiker Sheldon Cooper erklärte darin die 73 zu seiner Lieblingszahl. Die Begründung der TV-Figur: Die 73 sei die 21. Primzahl, und die 21 erhalte man, wenn man die Ziffern 7 und 3 miteinander multipliziere. Zudem ist die Spiegelzahl der 73, die 37, ebenfalls eine Primzahl, und zwar ausgerechnet die 12. – was wiederum die Spiegelzahl von 21 ist.

Was bei vielen Zuschauern für Lacher sorgte, brachte professionelle Mathematiker ins Grübeln: Gibt es noch mehr »Sheldon-Primzahlen« mit genau diesen Eigenschaften? Die Mathematiker Carl Pomerance vom Dartmouth College in New Hampshire und Christopher Spicer vom Morningside College in Iowa haben nun eine Antwort gefunden: Die 73 sei die einzige Primzahl, welche die von Sheldon genannten Kriterien erfüllt. Die Vermutung hatten Pomerance und Spicer schon länger, für ihren zehnseitigen Beweis benötigten sie letztlich aber Jahre.

Zunächst zeigten die beiden Forscher, dass es keine Sheldon-Primzahl geben kann, die größer als 10^{45} ist. Denn für eine so große n-te Primzahl ist das Produkt ihrer Ziffern gemäß dem berühmten Primzahlsatz immer kleiner als n selbst. Anschließend mussten die Mathematiker nur noch alle Konkurrenten der 73 im Zahlenraum zwischen 2 und 10^{45} ausschließen, was ihnen mit Hochleistungscomputern und Näherungsformeln gelang.

Weitere mathematische Entdeckungen auf Basis von »The Big Bang Theory« sind nicht zu erwarten: Im Mai 2019 strahlte der TV-Sender CBS die letzte Folge der Serie aus.

Mitteilung des Dartmouth-College, April 2019



GETTY IMAGES / CBS / MONTY BRINTON

Serienfigur Sheldon Cooper (rechts) ist ein mathematisches Genie – mit wenig Sinn für Zwischenmenschliches.

BIOLOGIE
DIE ZÄHNE DES DRACHENFISCHS

Eigentlich herrscht in der Tiefsee ewige Finsternis. Ihre Bewohner besitzen daher oft überdimensionierte Augen, oder sie können durch die so genannte Biolumineszenz selbst Licht erzeugen. Als Raubtier ist es deshalb sinnvoll, möglichst perfekt im Dunkeln zu verschwinden und nicht einmal das wenige vorhandene Licht zu reflektieren. Der Drachenfisch *Aristostomias scintillans* scheint diese Strategie perfektioniert zu haben: Das tiefschwarze, 15 Zentimeter lange Tier hat im Lauf der Evolution transparente Zähne entwickelt – und kann damit sogar mit offenem Maul auf die Jagd gehen.

Wie das Gebiss im Detail aufgebaut ist, hat nun ein Team um Audrey Velasco-Hogan von der University of California in San Diego ermittelt. Die Forscher schauten sich dazu die Beißwerkzeuge eines in 500 Meter Tiefe gefangenen *A.-scintillans*-Exemplars unter dem Elektronenmikroskop an. Der Analyse zufolge sind die Zähne von einer sehr harten, dem Zahnschmelz ähnelnden Schicht überzogen, die winzige Nanokörnchen enthält, ähnlich ungeordnet wie die Atome in Glas.

Licht wird in dem Material nur an wenigen Stellen reflektiert oder umgelenkt. Auch die Struktur des Zahnbeins ist so beschaffen, dass es transparent wirkt. Hierzu trägt unter anderem das Fehlen so genannter Dentinkanälchen bei, welche bei anderen Tieren und Menschen dafür sorgen, dass die Zähne weiß erscheinen.

Insgesamt wirken Drachenfische fast unsichtbar: Selbst das schwache Leuchten eines Bartfadens am Kinn, mit dem die Tiere ihre Beute anlocken, kann sie kaum aus der Dunkelheit hervorheben. Das mache *A. scintillans* vermutlich zu einem sehr erfolgreichen Jäger, folgern die Studienautoren.

Matter 10.1016/j.matt.2019.05.010, 2019



AUDREY VELASCO-HOGAN, UC SAN DIEGO

Klein, aber tödlich: Drachenfische können in der stockdunklen Tiefsee ihre Beute leicht überraschen.

ASTRONOMIE
HEIMATLOSE STERNE

Astrophysiker haben im weit entfernten Weltall mehrere Dutzend Sternenduos entdeckt, die vermutlich einst von Supernova-Explosionen aus ihrer Galaxie geschleudert wurden. Die Paare sind Teil des 60 Millionen Lichtjahre entfernten Fornax-Galaxienhaufens, befinden sich dort jedoch im Raum zwischen den einzelnen Galaxien. Das Team um Xiangyu Jin von der chinesischen Nanjing University konnte sie anhand von Röntgenstrahlung aufspüren, die sie kontinuierlich ins All feuern. Die Systeme haben vermutlich alle dieselbe turbulente Geschichte hinter sich: Einst umkreisten sich in ihnen zwei große Sonnen. Irgendwann war bei einer von ihnen das Brennmaterial aufgebraucht, wodurch diese in einer Supernova zu einem Neutronenstern kollabierte.

Da die gewaltige Explosion nicht ganz symmetrisch ablief, erhielt die Sternleiche einen kräftigen Rückstoß, der sie aus ihrer Galaxie schleuderte. Dabei zog die extrem kompakte Kugel ihren Partnerstern hinter sich her.

Der Neutronenstern saugte daraufhin Materie von seinem Nachbarn auf und sammelte diese in einer Akkretionsscheibe. Sie gibt große Mengen Röntgenstrahlung ab, wodurch sich derartige Systeme in den Weiten des Alls aufspüren lassen.

Die Forscher um Xiangyu Jin entdeckten die Signale in Messdaten des Weltraumteleskops Chandra, das in der Zielregion 1177 Röntgenquellen ausgemacht hat. Über den Vergleich mit optischen Teleskopaufnahmen bestimmten die Astrophysiker, welche davon sich abseits der von Sternen dominierten Regionen befanden.

In einem letzten Schritt mussten die Wissenschaftler die Systeme noch von anderen Röntgenquellen trennen, die sich im ausgedehnten Vorhof von Galaxien bewegen. Letztlich könne man bei etwa 30 der Quellen davon ausgesehen, dass sie ihre Galaxie vollständig verlassen haben, berichtet das Team.

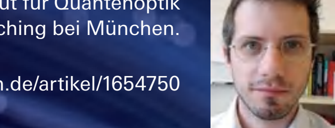
The Astrophysical Journal 10.3847/1538-4357/ab064f, 2019



QUANTENGRAVITATION FÜR IMMER UNVEREINBAR?

Bis heute scheiterten sämtliche Versuche, eine Quantentheorie der Gravitation zu entwickeln. Einige der führenden Experten sehen inzwischen der Möglichkeit ins Auge, dass ihr Vorhaben vielleicht gar nicht realisierbar ist. Doch dafür müssen sie ihr Verständnis der Quantenphysik grundlegend überdenken.

Antoine Tilloy ist Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München.



▸▸ spektrum.de/artikel/1654750

SHULZ / GETTY IMAGES / ISTOCK

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstanden zwei Theorien, die unser Weltbild völlig auf den Kopf gestellt haben: die Quantenphysik, die das seltsame Verhalten mikroskopischer Teilchen beschreibt, und die allgemeine Relativitätstheorie, bei der es um die Raumzeit und die dadurch entstehende Schwerkraft geht. Von der kleinsten bis zur größten Skala revolutionierten diese beiden Ideen unsere Vorstellung vom Universum: dass Objekte sich mal wie ein Teilchen, mal wie eine Welle verhalten und dass Raum und Zeit keinesfalls starr sind, sondern sich verändern können.

Allerdings sind die zwei Konzepte nicht miteinander kompatibel. Seit ihrer Entdeckung suchen Physiker nach einer fundamentalen Theorie, die beide zusammenführt. Eine Lösung ist noch nicht in Sicht. Aber ist eine Verschmelzung überhaupt notwendig? Und wenn ja, ist eine Theorie der Quantengravitation die einzige Möglichkeit, das zu erreichen? Einige Wissenschaftler – darunter auch ich – gehen inzwischen einen anderen Weg. Wir versuchen beide Welten in Einklang zu bringen, ohne eine Quantentheorie der Schwerkraft zu entwickeln.

Dafür müssen wir die Grundlagen der Quantenphysik überdenken. Diese in den 1920er Jahren unter anderem von Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und Paul Dirac begründete Disziplin führte in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zur so genannten Quantenfeldtheorie. Durch sie konnten die Physiker drei der vier fundamentalen Kräfte zu einem stimmigen Ganzen verbinden: dem Standardmodell der Teilchenphysik. Es beschreibt zuverlässig den Elektromagnetismus sowie die starke und die schwache Wechselwirkung.

Doch die Gravitation bleibt außen vor. Sie scheint völlig anderen Gesetzmäßigkeiten zu folgen. In der allgemeinen Relativitätstheorie, die Albert Einstein 1915 einführte, wechselwirken Materie und Raumzeit zu dem, was wir als Schwerkraft wahrnehmen: Materie und Energie krümmen die Raumzeit, und das beeinflusst wiederum die Bewegung der Teilchen.

Da beide Konzepte bisher unvereint blieben, greifen Physiker je nach Problem auf jeweils eine der beiden Theorien zurück. Interessieren sie sich für Situationen, in denen die Schwerkraft deutlich stärker wirkt als die elektromagnetische Kraft oder die zwei Kernkräfte, wie es in der Kosmologie meist der Fall ist, dann nutzen sie die allgemeine Relativitätstheorie. Möchten sie hingegen die heftigen Zusammenstöße von Partikeln in Teilchenbeschleunigern beschreiben, können sie die Gravitation außer Acht lassen und sich ganz auf die Gesetze der Quantenphysik konzentrieren. In beiden Fällen haben Wissenschaftler inzwischen erstaunliche Fortschritte gemacht und wichtige Erkenntnisse gewonnen.

Weil die Gravitation nur bei extrem massiven Objekten eine Rolle spielt, während Quanteneffekte dort vernachlässigbar sind, gibt es kaum Situationen, in denen man eine vereinheitlichte Theorie braucht. Daher fehlen experimentelle Ergebnisse, die uns sagen, was unter solchen Umständen vor sich geht.

Seit nunmehr 50 Jahren suchen Physiker erfolglos nach einer Quantentheorie der Schwerkraft, die beispielsweise Aufschluss über den Urknall oder die Natur Schwarzer Löcher geben könnte.

AUF EINEN BLICK
DIE SCHWERKRAFT BLEIBT, WIE SIE IST!

1. Die meisten Physiker gehen davon aus, dass man die Schwerkraft und die Quantenphysik nur durch eine Theorie der Quantengravitation vereinigen kann.

2. Die vielversprechendsten Versuche, etwa die Schleifenquantengravitation und die Stringtheorie, haben bisher nicht zu zufrieden stellenden Ergebnissen geführt.

3. Ein anderer Weg ist die semiklassische Gravitation, bei der die Schwerkraft ihren altbekannten Charakter behält. Ein erstes Modell zeigt jetzt, wie ein solcher Ansatz funktioniert.

Dennoch haben die größten offenen Fragen der Physik genau mit diesen seltenen Fällen zu tun. Was passierte zum Beispiel zu Zeiten des Urknalls, als die Elementarteilchen auf kleinstem Raum miteinander wechselwirkten? Oder was geschieht im Inneren Schwarzer Löcher, welche die Raumzeit so stark verzerren, dass ihnen selbst Licht nicht entkommen kann? Tatsächlich wissen wir es nicht – und zwar nicht, weil die Berechnungen zu kompliziert sind, sondern weil uns der gesamte theoretische Rahmen fehlt.

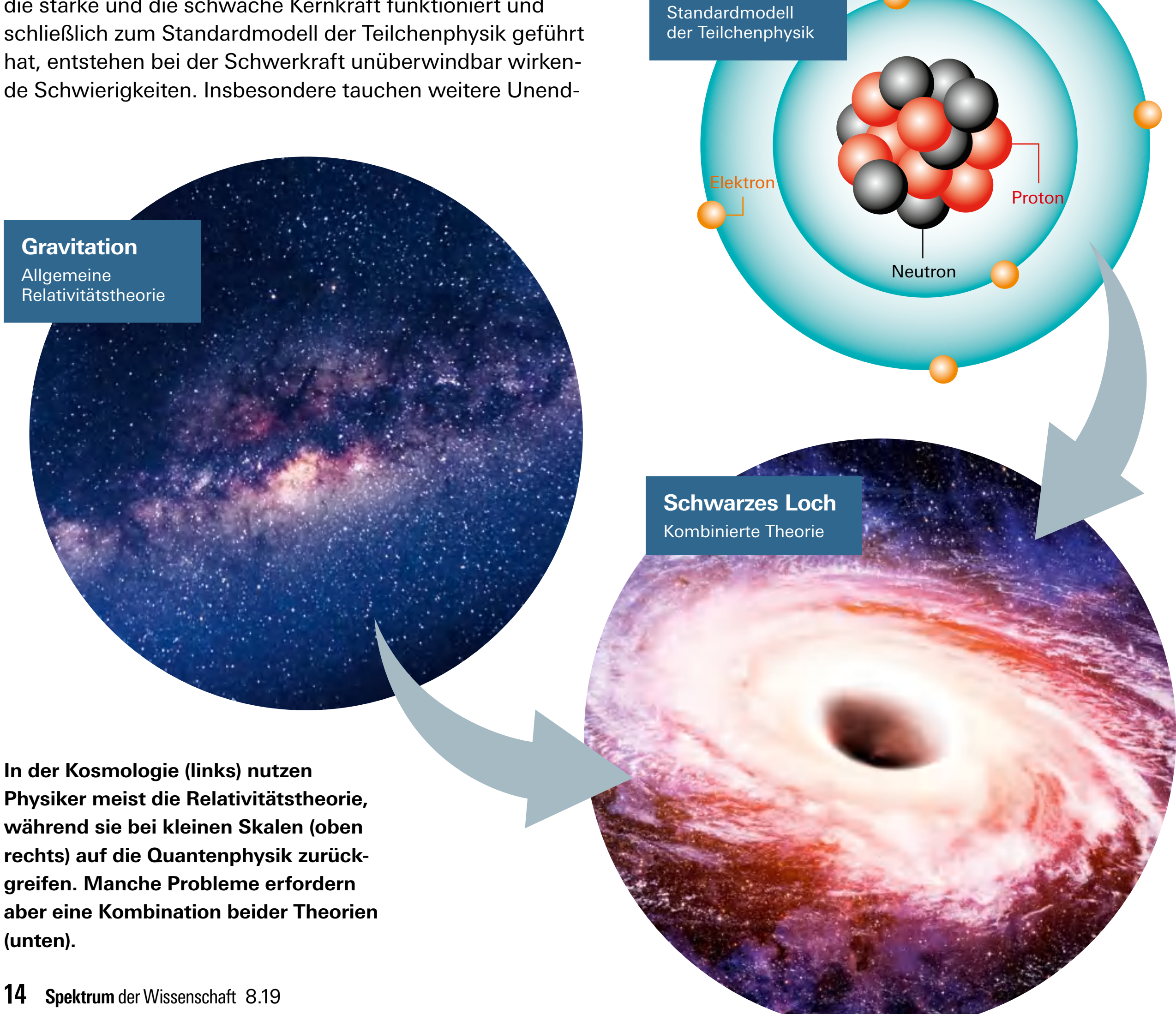
Häppchenweise Schwerkraft

Der allgemeinen Relativitätstheorie zufolge entstehen sowohl beim Urknall als auch im Inneren Schwarzer Löcher unendliche physikalische Größen. Das ist ein klares Signal dafür, dass die Theorie allein nicht ausreicht, um solche Situationen zu beschreiben. Offenbar muss man hier quantenphysikalische Effekte miteinbeziehen, die diese Unendlichkeiten zähmen (siehe **Spektrum** Februar 2019, S. 12).

Daher versuchten die US-Amerikaner John Wheeler und Bryce DeWitt bereits 1967 die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenphysik zu vereinen. Dabei gingen sie genauso vor wie Paul Dirac, der 1927 die Quantenelektrodynamik aus dem klassischen Elektromagnetismus herleitete: Sie nutzten die Methode der »kanonischen Quantisierung« (siehe »Kurz erklärt«, rechts). Während der Ansatz auch für die starke und die schwache Kernkraft funktioniert und schließlich zum Standardmodell der Teilchenphysik geführt hat, entstehen bei der Schwerkraft unüberwindbar wirkende Schwierigkeiten. Insbesondere tauchen weitere Unendlichkeiten auf, die man nicht loswird. Begriffe wie Zeit oder Kausalität sind dadurch kaum zu verstehen oder lassen sich im schlimmsten Fall überhaupt nicht mehr definieren.

Doch die Wissenschaftler gaben nicht auf. In den folgenden Jahren entwickelten sie exotischere Ansätze wie die »Schleifenquantengravitation« oder die »Stringtheorie«. Allerdings konnte man bisher für keine dieser spekulativen Theorien zeigen, dass sie die uns bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten vorhersagen, was eine unerlässliche Bedingung an sie ist.

Die Stringtheorie ist mit ihrem etwa 40-jährigen Bestehen die am intensivsten untersuchte Möglichkeit, die Schwerkraft mit der Quantenphysik zu verbinden. Stringtheoretiker gehen davon aus, dass Schwingungen winziger Fäden (»Strings«) die uns bekannten Elementarteilchen und fundamentalen Kräfte erzeugen. Insgesamt hat diese Theorie kaum noch etwas mit der kanonischen Quantisierung gemeinsam, wodurch sie das Problem der vielen Unendlichkeiten umgeht. Der Preis dafür ist jedoch hoch: Die Stringtheorie ist derart komplex, dass ihre mathematische Definition bisher vollständig fehlt. Das heißt, die



In der Kosmologie (links) nutzen Physiker meist die Relativitätstheorie, während sie bei kleinen Skalen (oben rechts) auf die Quantenphysik zurückgreifen. Manche Probleme erfordern aber eine Kombination beider Theorien (unten).

Forscher haben nicht einmal Formeln, mit denen sie rechnen könnten. Zudem ist sie übermäßig flexibel; sie lässt sich so anpassen, dass aus ihr fast jede Vorhersage folgt. Daher ist sie kaum widerlegbar.

Andere Versuche, eine Quantengravitationstheorie zu formulieren, stecken ebenfalls in der Klemme. Das hat einige Physiker dazu ermutigt, einen neuen Weg einzuschlagen. Vielleicht lässt sich die Schwerkraft ja so schwer quantisieren, weil sie sich wirklich grundlegend von den drei anderen fundamentalen Kräften unterscheidet. Tatsächlich gibt es kein Prinzip, das besagt, dass die Gravitation quantisiert sein muss. Man könnte eine Theorie entwickeln, welche die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenphysik verbindet und dabei die klassische Beschreibung der Schwerkraft beibehält, diese aber auf mikroskopische Teilchen ausdehnt. Diesen Ansatz bezeichnet man als semiklassische Gravitation.

Natürlich widerspricht die Idee dem wissenschaftlichen Ästhetikempfinden, weil sich die Schwerkraft dadurch weiterhin von allen anderen Wechselwirkungen unterscheiden würde. Doch warum sollte das Universum unserem Sinn von Schönheit entsprechen (siehe **Spektrum** November 2018, S. 14)?

In einer semiklassischen Theorie bestimmt die gekrümmte Raumzeit, wie sich die den quantenphysikalischen Gesetzen folgende Materie bewegt, während die Teilchen gleichzeitig die Raumzeit verformen. In dieser doppelten Dynamik ist es einfach, die Gleichungen der Quantenphysik so anzupassen, dass die Materie einer vorgegebenen Krümmung folgt. Das haben Forscher wie Bill Unruh, Stephen Hawking, Roger Penrose und Robert Wald schon in den 1970er Jahren getan. Ihre Berechnungen sind zwar recht aufwändig, sie konnten jedoch beispielsweise ultrakalte Atome im Gravitationsfeld der Erde beschreiben oder die experimentell bisher noch nicht nachgewiesene Strahlung von Schwarzen Löchern (»Hawking-Strahlung«) vorhersagen.

Seltsame quantenphysikalische Eigenschaften werfen Fragen für die Schwerkraft auf

Umgekehrt haben Wissenschaftler keine Ahnung, wie Quantensysteme die Raumzeit krümmen, also gravitativ wirken. Das liegt vor allem an einer Besonderheit der Quantenphysik, die es in der klassischen Welt nicht gibt: das Prinzip der Überlagerung. Solange man die Eigenschaften eines mikroskopischen Objekts (etwa Ort, Geschwindigkeit oder Energie) nicht misst, kann es in mehreren Zuständen gleichzeitig existieren. Aber wie soll man die gravitative Masse eines Teilchens bestimmen, wenn man dessen genauen Zustand nicht kennt? Solche Fragen lässt die Quantenphysik unbeantwortet. Selbst nach mehr als 90 Jahren ist die Theorie eine Art Blackbox. Man kann zwar Wahrscheinlichkeiten dafür berechnen, wie ein Experiment ausgeht, doch man erfährt nicht, was dabei wirklich passiert.

Um das zu verdeutlichen, überlegte sich Schrödinger ein berühmtes Gedankenexperiment (siehe Bild S. 16). Er beschrieb eine Katze, die zusammen mit einem instabilen Atomkern in einer Box eingesperrt ist. Zerfällt der Kern, wird Giftgas freigesetzt, das die Katze tötet. Solange die Box geschlossen ist, kann sich das Atom im überlagerten Zustand »zerfallen« und »nichtzerfallen« befinden. Das würde bedeuten, dass die Katze gewissermaßen sowohl tot als auch lebendig wäre. Aber kann sich ein makroskopisches Objekt wie eine Katze überhaupt in einem überlagerten Zustand befinden? Öffnet man die Box, um das zu überprüfen, kommt das einer Messung gleich, und die Katze wäre entweder eindeutig tot oder lebendig.

Angesichts der unbefriedigenden Situation haben etliche Physiker (siehe **Spektrum** Dezember 2018, S. 20) zahlreiche Interpretationen der Quantenmechanik entwickelt, die solche Ungewissheiten klären sollen (siehe »Wie interpre-

Kurz erklärt: Kanonische Quantisierung

Die Quantenmechanik unterscheidet sich insofern von der klassischen Physik, als viele beobachtbare Größen keine kontinuierlichen Werte besitzen, sondern bloß »gequantelt« auftreten, das heißt, sie ändern sich ruckartig. Ein Beispiel für eine solche Größe ist die Energie oder der Impuls eines Teilchens.

Möchte man eine physikalische Theorie wie die klassische Mechanik in die Quantenmechanik überführen, muss man sie »quantisieren«. Dazu verändert man sie derart, dass die entsprechenden Messwerte nicht mehr kontinuierlich sind. Das kann man auf mehrere Weisen erreichen.

Die wohl einfachste Methode ist die 1927 von Paul Dirac eingeführte »kanonische Quantisierung«. Dabei behält man die grobe Struktur der klassischen Mechanik bei. Die so genannte Hamiltonfunktion, aus der die zeitliche Entwicklung des Orts und der Geschwindigkeit eines Teilchens folgen, taucht beispielsweise auch in der Quantenmechanik auf.

Allerdings wird die Funktion dort zu einem so genannten Operator. Die übrigen Beziehungen zwischen den physikalischen Größen, die man aus der klassischen Mechanik kennt, bleiben genauso bestehen. Diese Größen muss man aber ebenfalls durch Operatoren ersetzen. Eine Folge davon ist, dass der Impuls oder die Energie der Quantensysteme dann quantisierte Werte annehmen.

In der kanonischen Quantisierung wird also der mathematische Unterbau der physikalischen Theorie gewechselt, während die physikalischen Zusammenhänge erhalten bleiben: Im klassischen Bild spielen kontinuierliche Variablen und deren Ableitungen eine Rolle, während in der Quantenmechanik Operatoren und komplexe Zahlen, die Wurzeln aus negativen Zahlen enthalten, aufeinandertreffen.

tiert man die Quantenmechanik?«, S. 18). Ein Beispiel dafür lieferten 1962 Christian Møller und Léon Rosenfeld, die annahmen, dass quantenmechanische Überlagerungen real sind. Dadurch würde die Energie aller möglichen Zustände eines Teilchens die Raumzeit krümmen. Das klingt so weit logisch, doch leider führt diese Überlegung zu Problemen – denn die Theorie lässt zu, dass sich Information schneller als das Licht ausbreitet, was der speziellen Relativitätstheorie widerspricht. Letzte ist jedoch durch unzählige experimentelle Überprüfung inzwischen gefestigt.

Mit solchen Schwierigkeiten kämpft die Quantenphysik seit ihren Anfängen. Das fiel erstmals Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen auf. In einer Arbeit aus dem Jahr 1935 stellten sie sich zwei Teilchen in einem Zustand der Form: »Teilchen 1 ruht, Teilchen 2 bewegt sich« und »Teilchen 1 bewegt sich, Teilchen 2 ruht« vor. So ein System heißt verschränkt, weil die Eigenschaften beider Teilchen eng miteinander verbunden sind. Wenn man weiß, dass sich Teilchen 1 bewegt, ist augenblicklich klar, dass Teilchen 2 ruht. Eine Messung des einen Teilchens fixiert also sofort den Zustand des anderen, egal wie weit sie voneinander entfernt sind.

Einstein, Podolsky und Rosen kamen daher zu dem Schluss, dass Überlagerungen nicht real sein können und bloß aus unserer eigenen Unwissenheit folgen. In Wirklichkeit gäbe es nur eine Realität, die schon vor der Messung feststeht. Ihrer Ansicht nach war der Formalismus der Quantenphysik unvollständig.

Der nordirische Physiker John Stewart Bell ging 1964 dieser Schlussfolgerung am CERN nach. Eine Theorie, in der sich Ereignisse über die von der Lichtgeschwindigkeit festgelegten Grenzen hinweg beeinflussen, heißt »nichtlokal«. Er konnte zeigen, dass jede lokale Theorie mehrere Ungleichungen erfüllen muss. Falls Einstein und seine Kollegen also Recht hätten und die Quantenphysik eigentlich lokal ist – wir sie aber aus mangelndem Wissen als nichtlokal wahrnehmen –, müsste sie die bellschen Ungleichungen erfüllen. Das lässt sich experimentell testen. 1982 fanden Alain Aspect vom Institut d'Optique in Orsay und sein Team in einem Versuch mit verschränkten Photonen heraus, dass sie die bellschen Ungleichungen verletzt. Die Quantenmechanik ist also tatsächlich nichtlokal. Einstein, Rosen und Podolsky hatten Unrecht.

Doch was bedeutet das für die spezielle Relativitätstheorie? Glücklicherweise befolgt die Quantenmechanik sie in einer abgeschwächten Form: Verschränkte Teilchen können sich zwar verzögerungsfrei beeinflussen, man kann sie aber nicht dazu nutzen, um Information überlichtschnell zu übertragen.

Überlichtschnelle Übertragung von Information

Ein ähnliches Problem tauchte wieder auf, als Møller und Rosenfeld versuchten, die klassische Theorie der Schwerkraft mit der Quantenphysik zu verbinden. Nimmt man an, dass Überlagerungen real sind und zur Krümmung der Raumzeit beitragen, verändern sich die Formeln der Quantenmechanik. Insbesondere die Schrödingergleichung, die den zeitlichen Aspekt der Theorie beschreibt, gewinnt dadurch an zusätzlichen Termen. Dem Physiker Nicolas Gisin von der Universität Genf fiel 1989 auf, dass diese Veränderungen überlichtschnelle Informationsübertragung ermöglichen würden. Das machte Møllers und Rosenfelds Ansatz zunichte. Doch nicht nur das – Gisin zeigte, dass jeder zusätzliche nichtlineare Term in der Schrödingergleichung die spezielle Relativitätstheorie verletzt.

Physiker fragten sich daraufhin, ob es überhaupt möglich ist, eine klassische Theorie der Raumzeit mit der Quantenphysik zu verbinden, ohne dabei Widersprüche zu erzeugen. Denn die Schrödingergleichung würde dadurch stets an nichtlinearen Komponenten gewinnen.



Erwin Schrödinger beschrieb in seinem berühmten Gedankenexperiment eine Katze, die mit einem instabilen Element (lila Kiste) in einer Box gefangen ist. Ein Geigerzähler (gelb) ermittelt, ob der Atomkern zerfällt, und löst in einem solchen Fall einen Mechanismus aus, der ein tödliches Gift (grün) freisetzt.

Aber nicht bloß das offenbare Ausscheiden einer semiklassischen Theorie enttäuschte die Physiker. Laut Gisins Ergebnis war es auch unmöglich, die Quantenphysik so zu modifizieren, dass sie die vielen offenen Fragen aus diesem Bereich beantwortet. Tatsächlich gibt die Quantenphysik auch heute noch vielen Forschern Rätsel auf. Beispielsweise möchte man verstehen, ob Überlagerungen real sind und warum Messungen diese vielfältigen Zustände zerstören. Einige Physiker argumentieren, dass sich Messgeräte fundamental von mikroskopischen Teilchen unterscheiden und sie deshalb bei einem Kontakt zwingen, einen einzigen Zustand anzunehmen. Warum sollten Messgeräte eine andere Natur als Quantenteilchen haben, wenn sie doch aus Atomen bestehen, die für sich den Gesetzen der Quantenwelt gehorchen?

Physiker suchten daher Ende der 1980er Jahre nach einer übergeordneten Theorie, die erklärt, weshalb es keine makroskopischen Überlagerungen gibt. Ihre Idee bestand darin, die Schrödingergleichung so zu verändern, dass große Systeme automatisch in einen einzigen Zustand kollabieren. Doch wie sollte man das tun, ohne der speziellen Relativitätstheorie zu widersprechen?

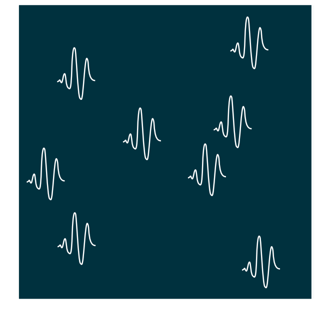
Den Grundstein dafür legte Gisin selbst bereits im Jahr 1984, als er der Schrödingergleichung einen Term hinzufügte, der vom Zufall bestimmt ist. Daraufhin mittelten sich die nichtlinearen Beiträge über die Zeit weg – die überlichtschnelle Informationsübertragung blieb in diesem Modell also ausgeschlossen. Gisins innovativer Ansatz führte zu einer modifizierten Version der Quantenmechanik, die als »spontane Lokalisierung« bezeichnet wird (siehe **Spektrum** August 2018, S. 12).

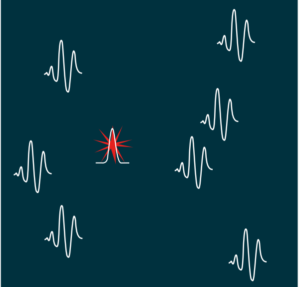
Zunächst ignorierten Wissenschaftler jedoch die Möglichkeit, damit eine semiklassische Gravitationstheorie zu konstruieren. Sie dachten, dass sich daraus entstehende Vorhersagen ohnehin nicht experimentell testen ließen. Die Situation änderte sich um das Jahr 2010, als sich mehrere Physiker unabhängig voneinander einige Versuche überlegten, die den quantenmechanischen Charakter der Gravitation erforschen könnten.

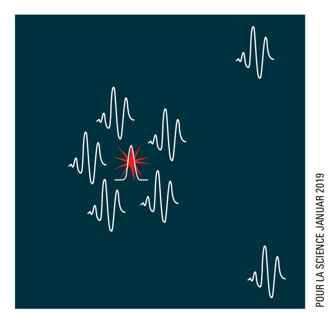
Um den Ausgang eines solchen Versuchs mit theoretischen Vorhersagen zu vergleichen, braucht man aber eine semiklassische Theorie der Gravitation. Und die gab es um 2010 noch nicht. Mangels Alternativen waren theoretische Physiker gezwungen, den fehlerhaften Ansatz von Møller und Rosenfeld zu nutzen. Sie hofften, damit wenigstens die Größenordnungen der experimentellen Ergebnisse grob abschätzen zu können.

Dvir Kafri und Jacob Taylor von der University of Maryland gaben sich damit nicht zufrieden. 2014 entwickelten sie zusammen mit Gerard Milburn von der University of Queensland erstmals ein konsistentes semiklassisches Gravitationsmodell, indem sie eine Variante eines spontanen Lokalisierungsmodells nutzten. Allerdings entspricht die daraus abgeleitete gravitative Anziehung zweier Objekte nicht der Realität. Sie stimmt nicht mit den Gesetzen über-

Spontane Lokalisierung durch »Blitze«







POUR LA SCIENCE JANUAR 2019

Wie Schrödinger mit seiner zeitgleich toten und lebendigen Katze verdeutlicht hat, sind überlagerte Zustände – zumindest theoretisch – nicht auf den Mikrokosmos beschränkt. Wendet man die Schrödingergleichung auf Alltagsgegenstände an, die aus einer großen Anzahl von Teilchen bestehen, ergeben sich daraus immer Überlagerungen. Ein solcher Zustand wurde jedoch noch nie beobachtet.

Um das zu erklären, schlugen Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber (GRW) 1986 ein Modell vor, in dem die Wellenfunktion eines Teilchens manchmal einen »Blitz« erfährt. Das Teilchen materialisiert sich dann an einer präzisen Stelle (»spontane Lokalisierung«). Dieses Ereignis soll aber bloß mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintreten, so dass es durchschnittlich weniger als einmal in mehreren Milliarden Jahren passiert.

Dadurch beeinflusst ein Blitz kaum die mikroskopische Dynamik. Dafür materialisieren sich in einem makroskopischen Objekt, das aus etwa 10^{20} Atomen oder mehr besteht, jede Sekunde Milliarden Elementarteilchen, was Überlagerungen zerstört.

Das GRW-Modell fügt der Quantenmechanik allerdings neue Parameter hinzu (zum Beispiel die Häufigkeit, mit der sich Partikel materialisieren), ohne zu erklären, woher sie kommen. Nur wenige Physiker glauben daher, dass das GRW-Modell die konzeptionellen Probleme der Quantenphysik lösen wird.

Die spontane Lokalisierung erlaubt es aber, mögliche Wege zu einer semiklassischen Theorie zu erkunden. In dem 2015 von Antoine Tilloy und Lajos Diósi entwickelten Modell führt der zufällige Blitz (Mitte, rot) dazu, dass ein Teilchen eine Masse erhält und dadurch ein Gravitationsfeld erzeugt, das die anderen Wellenfunktionen anzieht (rechts).

Wie interpretiert man die Quantenmechanik?

Die Quantenphysik besteht aus vielen Gesetzen und Regeln, mit denen man die Wahrscheinlichkeiten dafür berechnen kann, wie ein mikrophysikalisches Experiment ausgeht. Dieser mathematische Formalismus sagt allerdings nichts über die zu Grunde liegende Realität aus. Welche Bedeutung die Wellenfunktion hat oder was in der Quantenwelt genau passiert, ist ungewiss.

Um die gravitative Masse eines Quantensystems zu bestimmen, die man für eine semiklassische Gravitationstheorie braucht, muss man jedoch die Antworten auf solche Fragen kennen. Physiker haben bis heute Dutzende von konkurrierenden Interpretationen der Quantenphysik entwickelt.

Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung entwickelte der dänische Physiker Niels Bohr mit einigen Kollegen in den Anfängen der Quantenmechanik. Tatsächlich existieren verschiedene Varianten dieser Interpretation, die der Wellenfunktion jeweils einen anderen Stellenwert zuschreiben. In heutigen Lehrbüchern findet man meist die so genannte orthodoxe Deutung, die teilweise von Bohrs eigenen damaligen Vorstellungen abweicht. In ihr ist die Frage nach der Bedeutung der Wellenfunktion irrelevant, da diese als metaphysisch betrachtet wird.

Inspiriert von der positivistischen Philosophie geht der orthodoxe Ansatz davon aus, dass sich eine physikalische Theorie auf die Vorhersage experimenteller Ergebnisse beschränken sollte. Jede weitere Diskussion sei dabei bestenfalls überflüssig. Der US-amerikanische Festkörperphysiker David Mermin, ein Kritiker der Philosophie, fasste die Kopenhagener Deutung 1989 in einem prägnanten Slogan zusammen: »Shut up and calculate« (Halt die Klappe und rechne). Dieser erscheint einigen Physikstudenten vertraut, da viele Professoren eine solche Auffassung vertreten.

Begeistert vom Erfolg ihres minimalistischen Ansatzes, machten einige Gründer der Quantenphysik den Fehler, ihn für unvermeidlich zu halten. Zum Beispiel schrieb der deutsche Physiker Werner Heisenberg 1958: »Die Vorstellung einer objektiven, realen Welt, deren kleinste Teile in der gleichen Weise objektiv existieren wie Steine und Bäume, gleichgültig, ob wir sie beobachten oder nicht, ist unmöglich.« Das konnten Wissenschaftler nie beweisen. Die Frage nach dem, was in der Quantenmechanik real ist, ist heute noch genauso offen wie zu ihren Anfängen.

ein, die der Physiker Isaac Newton bereits vor etwa 350 Jahren niederschrieb. Dennoch ebnete Kafris und Taylors Versuch erstmals den Weg in Richtung einer semiklassischen Gravitationstheorie.

Ein Jahr später konnten sie ihren Ansatz jedoch leicht verändern und so die richtige Gravitationskraft vorhersagen – zumindest im nichtrelativistischen Fall. Sobald sich Objekte extrem schnell bewegen, versagt ihre Methode. Allerdings funktioniert ihre Rechnung nur für ein vereinfachtes Modell des Universums: Anstatt kontinuierliche Abstände vorauszusetzen, ist in ihrer Version der Raum wie ein Netzwerk in diskrete Gitterpunkte aufgeteilt.

Zusammen mit Lajos Diósi von der Ungarischen Akademie der Wissenschaften habe ich im gleichen Jahr die Ideen von Kafri und seinen Kollegen weiterentwickelt. Indem wir die Vorteile der spontanen Lokalisierungsmodelle weiter nutzten, gelang es uns, die richtige Gravitationskraft für eine kontinuierliche Raumzeit für den nichtrelativistischen Fall herauszuarbeiten. Damit können wir erstmals realistische Vorhersagen für gewöhnliche Laborexperimente treffen.

Doch wie interpretieren spontane Lokalisierungsmodelle die gravitative Masse eines mikroskopischen Teilchens? In der Quantenmechanik beschreibt die Wellenfunktion die überlagerten Zustände eines Objekts. Die Schrödingergleichung diktiert dabei ihren zeitlichen Verlauf. Bei spontanen Lokalisierungsmodellen unterbrechen zufällige »Blitze« die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion, was Überlagerungen zerstört. Der Begriff Blitz soll den flüchtigen Charakter des Vorgangs zu verdeutlichen und hat nichts mit Licht oder Photonen zu tun.

Zufällige Blitze verleihen Teilchen ihre Realität

Diósi und ich gehen davon aus, dass ein Teilchen erst dann wirklich real wird, wenn es von einem Blitz getroffen wird. Zu diesem Zeitpunkt materialisiert es sich, erhält also eine Masse und erzeugt damit ein Gravitationsfeld, das das restliche System anzieht. Irgendwann materialisiert sich ein anderes Teilchen, zieht ebenfalls die übrigen Partikel an und so weiter. Die Schwerkraft zeigt sich in dem Modell also auf ruckartige Weise.

Auch wenn die stoßweise Dynamik nicht zu unserer Wahrnehmung einer kontinuierlichen Gravitation passt, widerspricht sie nicht den bisherigen experimentellen Ergebnissen, weil man solche genauen Messungen noch gar nicht durchführen konnte. Die Schwerkraft ist dafür viel zu schwach: Laborversuche, die die gravitative Anziehung zweier Elementarteilchen bestimmen, sind bis auf Weiteres außer Reichweite. Selbst ein Golfball, der immerhin aus mehr als 10^{20} Atomen besteht, erzeugt eine kaum messbare Schwerkraft.

Viele-Welten-Theorie
Der US-Amerikaner Hugh Everett entwickelte 1956 die Viele-Welten-Theorie (siehe **Spektrum** April 2008, S. 24). Ihr zufolge sind überlagerte Zustände real und existieren gleichzeitig: So trennt sich beispielsweise bei jeder Messung von Schrödingers Katze ein Universum, in dem sie lebt, von einem anderen, in dem sie tot ist. Der deutsche Physiker Dieter Zeh fand 1970 heraus, dass dieser Ansatz mit unserem Eindruck vereinbar ist, in bloß einem einzigen Universum zu leben. Denn sobald sich zwei Universen ausreichend unterscheiden, können sie ihm zufolge nicht mehr miteinander wechselwirken.

Bohmsche Mechanik
Die 1952 vom US-amerikanischen Physiker David Bohm eingeführte bohmsche Mechanik (siehe **Spektrum** Juli 1994, S. 70), dessen Idee von einer Arbeit des Franzosen Louis de Broglie aus dem Jahr 1927 stammt, beschreibt eine Welt aus Punktteilchen, die deterministisch von ihrer Wellenfunktion geleitet werden. 1993 stellten die Physiker Detlef Dürr, Sheldon Goldstein und Nino Zanghi fest, dass die empirischen Vorhersagen der bohmschen Mechanik mit denen des orthodoxen Kopenhagener Ansatzes übereinstimmen.

Spontane Lokalisierung
Spontane Lokalisierungsmodelle verändern die Gesetze der Quantenmechanik leicht, um makroskopische Überlagerungen unmöglich zu machen. Der Preis dafür ist eine winzige Änderung der quantenphysikalischen Vorhersagen, die noch nicht beobachtet wurden. Im Modell von Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber (GRW) von 1986 ist diese Änderung eine kollabierende Wellenfunktion. Ein solches Ereignis soll extrem selten und zufällig an irgendeinem Punkt im Raum stattfinden. Der Kollaps der Wellenfunktion, der in der Kopenhagener Deutung bloß durch eine Messung hervorgerufen werden kann, erfolgt dabei auf natürliche Weise.

QBismus
2001 entwickelten Carlton Caves, Christopher Fuchs und Rüdiger Schack die Theorie des »QBismus« (siehe **Spektrum** November 2013, S. 46): Die quantenmechanische Wellenfunktion dient dabei bloß als mathematisches Werkzeug, das die Erwartungen eines Beobachters an das untersuchte Quantensystem widerspiegelt.

Eine solche rein statistische Betrachtung ist zwar attraktiv, aber nicht mit den Ergebnissen der bellschen Ungleichungen vereinbar, denen zufolge die Quantenphysik nichtlokal ist. Um solche Widersprüche zu vermeiden, muss man auf den Begriff der objektiven Realität verzichten. Dadurch sind experimentelle Ergebnisse subjektiv – sie hängen vom Beobachter ab. Für Fuchs ist die Wirklichkeit partizipativ: geschaffen von und für den Betrachter. Im QBismus muss man akzeptieren, wie es David Mermin ausdrückt, »dass der Mond nachweislich nicht da ist, wenn man nicht hinsieht«.

Die Milliarden Blitze und dadurch entstehenden »Gravitationsschübe« in einem solchen makroskopischen Objekt erwecken unserem Modell zufolge den Eindruck, dass sich ein Gravitationsfeld kontinuierlich bewegt. Dennoch hätte eine ruckartige Schwerkraft Folgen, die sich im Labor testen ließen. Zum Beispiel erhöht jeder Blitz die kinetische Energie eines Teilchens. Den geringen Energieanstieg könnte man etwa in ultrakalten Atomen beobachten, die sich dadurch langsam erwärmen würden. Allerdings gehe ich davon aus, dass künftige Experimente unser Modell widerlegen werden – schließlich führt es im relativistischen Bereich zu falschen Vorhersagen und spiegelt daher nicht unsere Wirklichkeit wider.

Dennoch stellt unsere Arbeit einen bedeutenden Schritt dar. Durch sie haben wir nämlich erstmals bewiesen, dass es durchaus möglich ist, eine hybride Theorie aus klassischer Gravitation und Quantenphysik zu konstruieren, was viele Wissenschaftler bisher bezweifelten. In Zukunft könnte man versuchen, unseren Ansatz derart zu verändern, dass er realistischere Vorhersagen liefert. Möglichkeiten dazu gibt es reichlich: Beispielsweise könnte jeder Blitz räumlich ausgedehnt sein oder über längere Zeit fortbestehen. Diese Flexibilität könnte jedoch auch eine Schwäche sein. Wenn sich jedes experimentelle Ergebnis durch eine kleine Änderung des Modells erklären lässt, verliert der Ansatz seinen vorhersagenden Charakter. Während das ursprüngliche Problem also darin bestand, überhaupt ein konsistentes semiklassisches Gravitationsmodell zu finden, besteht nun die Gefahr, dass es wie bei der Stringtheorie zu viele Lösungen gibt.

In den 1980er Jahren dachten Physiker, dass die Frage, ob die Schwerkraft quantenmechanischer oder klassischer Natur sei, sich nur mit Stift und Papier beantworten lasse. In naher Zukunft könnte sie sich aber in Laboren entscheiden. Am überraschendsten wäre es, wenn die Gravitation tatsächlich keinen quantenphysikalischen Charakter hätte. Das würde der Intuition der meisten Physiker zuwiderlaufen und zudem viele ihrer Anstrengungen der letzten 60 Jahre zunichtemachen. Wenn die Gravitation andererseits doch quantisiert ist, wird die Suche nach einer vereinheitlichten Theorie umso wichtiger. ◂

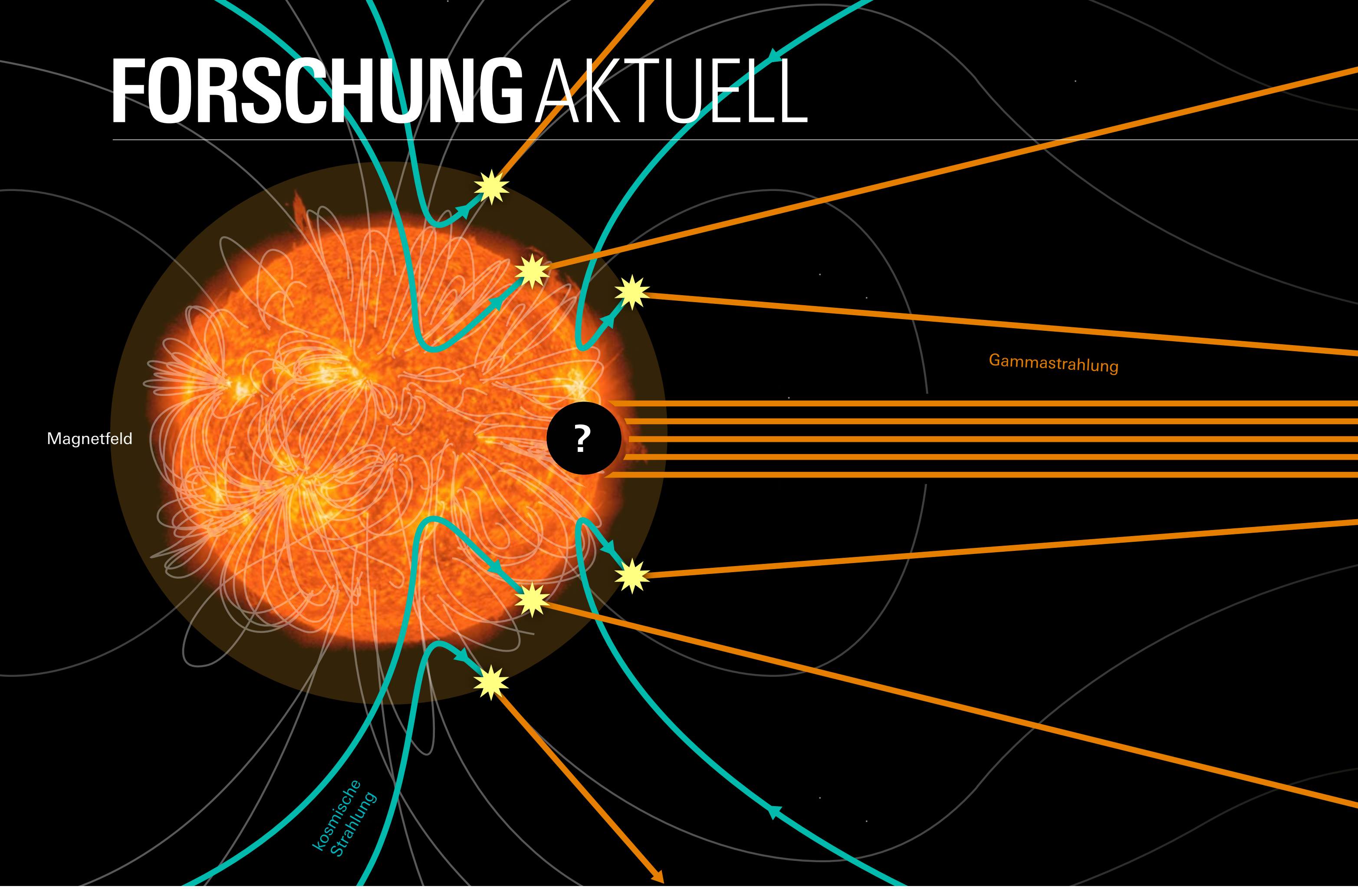
QUELLEN

Bose, S. et al.: A spin entanglement witness for quantum gravity. Physical Review Letters 119, 2017

Gisin, N.: Stochastic quantum dynamics and relativity. Helvetica Physica Acta 62, 1989

Kafri, D. et al.: A classical channel model for gravitational decoherence. New Journal of Physics 16, 2014

Tilloy, A.: Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes. Physical Review D 97, 2018



5W INFOGRAPHICS FÜR QUANTA MAGAZINE

ASTROPHYSIK

SONDERBARE STRAHLEN VON DER SONNE

Unser Zentralgestirn sendet sehr viel mehr hochfrequente Strahlung aus als erwartet. Liegt das an unbekannten Eigenschaften des solaren Magnetfelds – oder an noch exotischeren Vorgängen?

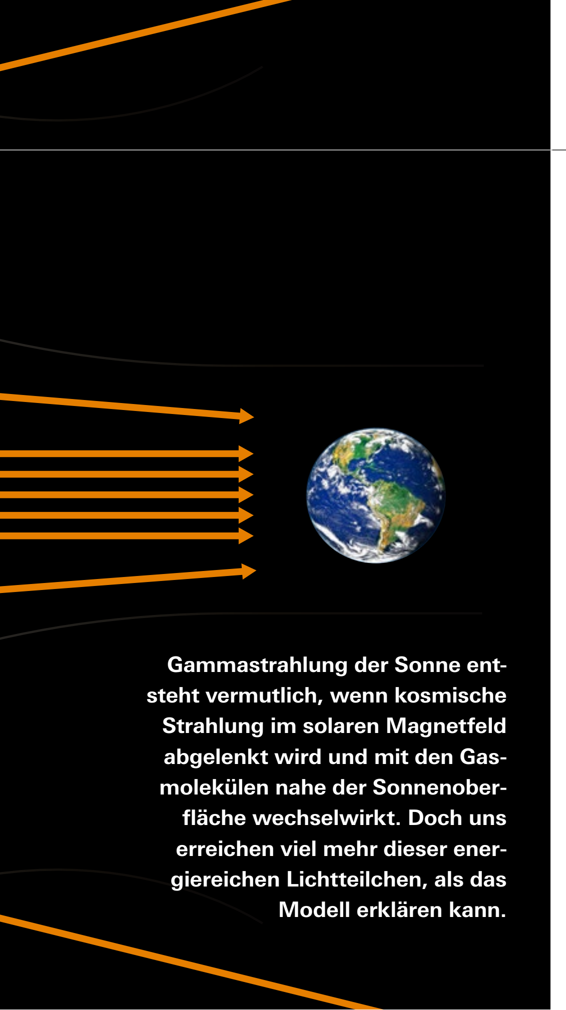
Gut ein Jahrzehnt lang haben Astronomen den Anteil der Strahlung unserer Sonne mit den höchsten Frequenzen beziehungsweise kleinsten Wellenlängen beobachtet. Nun stehen sie vor einem Mysterium: Von dieser so genannten Gammastrahlung erreicht uns siebenmal mehr als erwartet. Und seltsamerweise gibt es zudem innerhalb des Überschusses eine schmale Lücke – einen nahezu strahlungsfreien Frequenzbereich.

Diese und weitere kuriose Phänomene deuten möglicherweise auf unbekannte Eigenschaften des Magnetfelds der Sonne hin. Brian Fields, US-Astroteilchenphysiker an der University of Illinois in Urbana-Champaign, kommentiert den Fund: »Es ist verblüffend, dass wir ausgerechnet bei der Sonne, die wir eigentlich gut verstehen müssten, derart spektakulär danebenliegen.«

Erstmals stießen die Sonnenforscher in den Daten des Weltraumteleskops Fermi auf die unerwarteten Signale. Es befindet sich seit 2008 in der Erdumlaufbahn und sucht von dort aus den Himmel nach Quellen von Gammastrahlung ab. Je mehr Messungen die Wissenschaftler erhielten, desto besser konnten sie Einzelheiten im Spektrum der solaren Gammastrahlung ausmachen. »Wir fanden immer wieder Überraschendes«, meint die Astronomin Annika Peter von der Ohio State University in den USA, Koautorin einer im März 2019 veröffentlichten Überblicksarbeit. »Das ist das Seltsamste, das mir im Lauf meiner Karriere begegnet ist.«

Die Gammastrahlung ist nicht nur erheblich stärker, als es eine jahrzehntealte Theorie vorhergesagt hatte. Sie reicht außerdem bis zu weit höheren Frequenzen als bislang angenommen. Darüber hinaus variiert die Strahlung in unerklärlicher Weise einerseits im Lauf des elfjährigen Sonnenzyklus – die Zeitspanne, in der die Zahl der Sonnenflecke periodisch schwankt – sowie andererseits je nachdem, welchen Bereich der Sonnenoberfläche man betrachtet. Und dann befindet sich im Spektrum noch die Delle bei einer Frequenz von 10^{25} Hertz (das entspricht zehn Billionen Billionen Schwingungen pro Sekunde), bei der es zu wenig Gammastrahlung gibt. »Diese Lücke widerspricht allem, was bisher logisch erschien«, meint Tim Linden, ein weiterer Astroteilchenphysiker von der Ohio State University, der an der Analyse beteiligt war.

Die Physiker glauben allerdings eher nicht, dass die Gammastrahlung aus der Sonne selbst stammt. Die Kernfusion erzeugt dort zwar auch solche energiereichen Lichtteilchen, aber diese werden bereits im Sonneninneren



Gammastrahlung der Sonne entsteht vermutlich, wenn kosmische Strahlung im solaren Magnetfeld abgelenkt wird und mit den Gasmolekülen nahe der Sonnenoberfläche wechselwirkt. Doch uns erreichen viel mehr dieser energiereichen Lichtteilchen, als das Modell erklären kann.

5W INFOGRAPHICS FÜR QUANTA MAGAZINE

gestreut und dabei in Strahlung niedrigerer Frequenz umgewandelt.

Bereits 1991 stellten die Physiker David Seckel, Todor Stanev und Thomas Gaisser von der University of Delaware in den USA die Hypothese auf, die Sonne könne gleichwohl Gammastrahlung aussenden – ausgelöst durch die kosmische Strahlung. Dabei handelt es sich vor allem um Protonen, also Atomkerne des Wasserstoffs. Sie werden von den Stoßfronten weit entfernter Supernovae oder anderer explosiver Ereignisse in unser Sonnensystem katapultiert.

Schleuderfreudiges Magnetfeld

Gelegentlich komme es vor, so damals das Forschertrio, dass ein Teilchen aus dem All durch das gewundene, verdrehte Magnetfeld der Sonne zur Erde zurückgeworfen werde. »Das Proton bewegt sich rasant auf die Sonne zu, ändert in letzter Sekunde seine Bewegungsrichtung und saust zu uns zurück«, erläutert John Beacom, Professor an der Ohio State University, ein weiterer Autor der Überblicksarbeit. Auf dem Weg kollidiere das Proton dann mit Gasmolekülen der Sonnenatmosphäre und erzeuge dadurch ein ganzes Bündel von Gammastrahlen.

Seckel und seine Kollegen berechneten vor einem guten Vierteljahrhundert die Effizienz des Prozesses ausgehend von der Stärke der kosmischen Strahlung, die in das Sonnensystem eindringt, der geschätzten Stärke des solaren Magnetfelds, der Dichte der Sonnenatmosphäre sowie anderer Faktoren. Sie sollte bei etwa einem Prozent liegen. Die Sonne würde demzufolge im Bereich der Gammastrahlung nur schwach glimmen.

Doch wie die neuen Daten zeigen, empfängt das Fermi-Teleskop im Mittel siebenmal mehr Gammastrahlen von der Sonne als vorhergesagt. Jene mit den höchsten Frequenzen sind sogar 20-mal häufiger. »Demnach wäre der Prozess bei hohen Energien zu 100 Prozent effizient«, sagt Linden. »Also würde jedes auf die Sonne zurasende Teilchen der kosmischen Strahlung gespiegelt.« Dabei sollte es eigentlich umso schwieriger sein, die Bewegungsrichtung eines Teilchens umzukehren, je höher seine Energie ist.

Außerdem verrät das Modell von Seckel, Stanev und Gaisser nichts über die rätselhafte Lücke im Spektrum der Gammastrahlung. Seckel kann sich nicht erklären, wie sich eine tiefe, schmale Delle bildet, wenn man von dem gleichmäßig verlaufenden Energiespektrum der kosmischen Strahlung ausgeht. Es sei schwierig genug, mit den Berechnungen überhaupt eine Delle zu bekommen: »Höcker sind viel einfacher zu erhalten. Wenn etwas aus dem Inneren der Sonne kommt, ist das schließlich erst einmal eine zusätzliche Quelle. Aber wie mache ich daraus eine Strahlungssenke?«

Vielleicht hat die starke Gammastrahlung ja doch eine andere Ursache. Eine Möglichkeit wäre Dunkle Materie. Diese rätselhafte Substanz könnte von der Schwerkraft der Sonne eingefangen werden und sich in ihrem Zentrum ansammeln. Wird die Dichte der Dunkle-Materie-Teilchen hoch genug, vernichten sie sich vielleicht gegenseitig und erzeugen dabei Gammastrahlung. Aber wie sollte die aus dem Inneren nach außen gelangen, ohne gestreut und in Strahlung niedriger Energie umgewandelt zu werden?

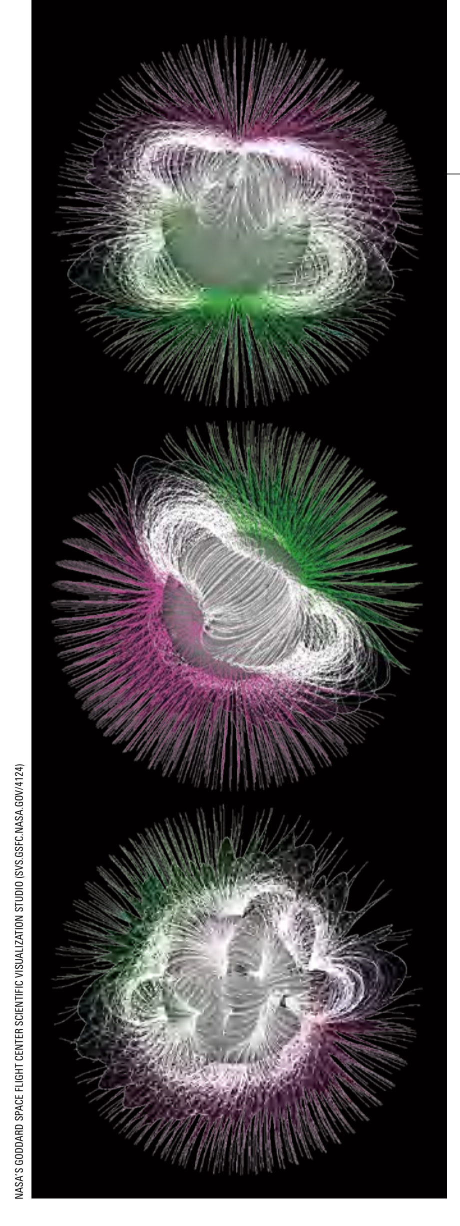
Immerhin weisen einige Aspekte des Überschusses durchaus in Richtung kosmischer Strahlung. So registriert das Fermi-Teleskop während des Aktivitätsminimums des elfjährigen Sonnenzyklus deutlich mehr Gammastrahlung. In dieser Phase ist das solare Magnetfeld vergleichsweise ruhig und geordnet. Dann erreichen mehr kosmische Teilchen das starke Magnetfeld nahe der Sonnenoberfläche, das sie reflektiert – und werden nicht bereits in größerer Entfernung durch verwickelte Magnetfeldlinien abgelenkt.

Andere Fakten sprechen aber dagegen: Die Intensität der Gammastrahlung fällt zwar mit zunehmender Energie ab, allerdings nicht auf die gleiche Weise wie die kosmische Strahlung. Würde Letztere die Erstere verursachen, dann sollten beide Kurven ähnlich verlaufen.

Die Vorgänge in der Sonne verraten etwas über ferne Sterne

Unabhängig von der Ursache erhoffen sich Sonnenforscher wie Joe Giacalone von der University of Arizona durch die Gammastrahlung »fundamentale Erkenntnisse über die magnetische Struktur der Sonne«. Die Sonne ist zwar der am besten untersuchte Stern, doch ihr Magnetfeld – erzeugt von einem wogenden Mahlstrom geladener Teilchen im Inneren – verstehen die Forscher bislang nicht sehr gut. Deshalb haben sie auch nur ein unklares Bild davon, wie Sterne allgemein in dieser Hinsicht funktionieren.

Giacalone verweist beispielsweise auf die Korona, die dünne Plasmahülle um die Sonne. Um Teilchen der kosmischen Strahlung effizient zu spiegeln, müsste das Magnetfeld dort seiner Ansicht nach stärker und anders orientiert sein, als Wissenschaftler annehmen. Andererseits darf das koronale Magnetfeld nur sehr nah an der Sonne kräftig ausgeprägt sein. Die Teilchen würden sonst zu früh abgelenkt und erreichten nicht die Region der Sonnenatmosphäre, die dicht genug ist, um die nötigen Kollisionen zu erzeugen. Be-



NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO (SVS.GSFC.NASA.GOV/4124)

Das Magnetfeld der Sonne ist sehr dynamisch und oft stark verwunden. Die drei Bilder zeigen Messungen der Raumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) im Januar 1997, im Juni 2003 und im November 2013. Grün bedeutet positive, violett negative Polarität.

sonders stark ist das Feld offenbar am Äquator während des solaren Minimums.

Die Erkenntnisse könnten dazu beitragen, das immer noch ungelöste Geheimnis des Sonnenzyklus zu lüften. »Alle elf Jahre kehrt sich das Magnetfeld der Sonne um«, erklärt Igor Moskalenko, Astrophysiker an der Stanford University und Mitglied des Fermi-Teams. »Aus dem magnetischen Nordpol wird der magnetische Südpol und umgekehrt. Das ist ein dramatischer Vorgang, schließlich ist die Sonne riesig. Wir wissen weder, wieso es diesen Polaritätswechsel gibt, noch, warum er so regelmäßig auftritt.« Die kosmische Strahlung und das Muster der von ihr erzeugten Gammastrahlen könnten helfen, die wichtige Frage zu beantworten, hofft Moskalenko.

Doch bislang gibt es keine überzeugende Idee, wie das solare Magnetfeld darüber hinaus die Delle im Gammabereich erzeugen könnte. Weil die Erscheinung dermaßen ungewöhnlich ist, bezweifeln manche Experten sogar ihre Existenz. Doch falls die Abwesenheit von Gammastrahlung bei diesen Frequenzen nur auf eine fehlerhafte Analyse oder ein Problem des Fermi-Teleskops zurückgehen sollte, dann hat zumindest bislang keiner die Ursache herausgefunden. »Es scheint nicht irgendein instrumenteller Effekt zu sein«, ist Elena Orlando von der Stanford University zuversichtlich. Sie betont, die Analyse sei auf Grund der scheinbaren Bewegung der Sonne am Himmel eine Herausforderung. Sie weiß, wovon sie redet – mit ihrem Team hatte sie 2008 erstmals mit dem Satelliten EGRET, dem Vorgänger von Fermi, Gammastrahlung von der Sonne nachgewiesen. Orlando ist zudem entscheidend an der Auswertung der Fermi-Messwerte beteiligt. Ihrer Ansicht nach sind mehr Daten und unabhängige Interpretationen nötig, um die Delle im Spektrum zu bestätigen.

Als Peter, Linden, Beacom und ihre Mitarbeiter 2018 die Delle in den Fermi-Daten fanden, versuchten sie zunächst alles, um sie wieder loszuwerden. Erst dann veröffentlichten sie ihre Entdeckung. »Auf etwa 15 Seiten im Anhang präsentieren wir verschiedene Tests, mit denen wir überprüft haben, ob vielleicht ein Rechenfehler vorliegt«, bekräftigt Linden. »Statistisch gesehen ist der Effekt jedenfalls signifikant.«

Infolge einer Fehlfunktion der Sonnenkollektoren war das Fermi-Teleskop 2018 meistens von der Sonne weg gerichtet. Doch inzwischen ist das Problem gelöst – gerade noch rechtzeitig zum solaren Minimum. Gegenwärtig führen die Feldlinien fein säuberlich von Sonnenpol zu Sonnenpol. Wenn diese Phase ähnlich ist wie die vorherige, sollte der Überschuss an Gammastrahlung nun besonders deutlich hervortreten. »Das macht es für uns sehr aufregend«, sagt Linden. »Wir erreichen gerade jetzt das Minimum der Sonnenaktivität. Deshalb hoffen wir, mit mehreren Teleskopen Gammastrahlung noch höherer Energie nachzuweisen.«

Bringen neue Messkampagnen bessere Einsichten?

Neben Fermi ist nun das Experiment HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory), das es vor elf Jahren noch nicht gab, an den Beobachtungen beteiligt. Mit der zwischenzeitlich in Mexiko errichteten Detektoranlage lassen sich Gammastrahlen höherer Frequenz aufspüren als mit Fermi.

Wissenschaftler hoffen auf mehr Informationen über den Überschuss und wollen außerdem herausfinden, ob sich die räumliche Verteilung der Gammastrahlung im Vergleich zum letzten solaren Minimum verändert hat. Denn während die Teilchen der kosmischen Strahlung weiterhin elektrisch positiv geladen sind, hat sich das Magnetfeld der Sonne gerade umgekehrt. »Schlimmstenfalls müssen wir eingestehen, dass die Sonne seltsamer und spannender ist, als wir uns bisher vorstellen konnten«, meint Beacom. »Und bestenfalls stoßen wir auf irgendeine Art von neuer Physik.« ◂

Natalie Wolchover ist Physikerin in New York und regelmäßige Autorin für das »Quanta Magazine«.

QUELLE

Nisa, M. U. et al.: The Sun at GeV–TeV energies: A new laboratory for astroparticle physics. arXiv:1903.06349, 2019

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The Sun Is Stranger Than Astrophysicists Imagined« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



CHEMIE

ABKÜRZUNG ZU KOMPLEXEN MOLEKÜLEN

Wirkstoffe für Medizin und Pflanzenschutz herzustellen, ist oft langwierig und aufwändig. Eine neue Reaktion könnte die Synthese vieler neuer Substanzen nun deutlich verkürzen.

Chemiker investieren viel Zeit, um neue Wirkstoffkandidaten für Medikamente und Pflanzenschutzmittel zu schaffen. Solche Moleküle sind oft hochkomplex und besitzen viele verschiedene funktionelle Gruppen, das heißt Einheiten von Atomen, die bestimmte chemische Effekte haben. Um die Strukturen aufzubauen, braucht es vor allem viel Geduld und kreative Ideen, welche Ausgangssubstanzen und Reaktionen zum Zielmolekül führen.

Die gewünschten Moleküle setzen Wissenschaftler entweder aus kleinen Bausteinen zusammen (De-novo-Synthese) oder sie erweitern eine Struktur, die der Zielsubstanz bereits ähnelt, um die benötigten Gruppen (Late-stage-Funktionalisierung). Da man sich meist eine möglichst kurze Synthese wünscht, ist die letztere Strategie ein interessantes Feld in der organischen Chemie.

Um ein bereits kompliziertes Molekül um weitere chemische Gruppen zu ergänzen, benötigt man Reaktionen, die eine vorhandene Struktureinheit verändern können. Die häufigste Struktureinheit ist in den meisten komplexen Molekülen die Bindung zwischen Kohlenstoff und Wasserstoff (C–H-Bindung), zum Beispiel die aromatische C–H-Bindung. Daher bietet es sich an, deren Wasserstoffatome gegen funktionelle Gruppen auszutauschen. Dass C–H-Bindungen so häufig vorkommen, stellt aber zugleich eine große Herausforderung an die Selektivität der Reaktion: Man muss nun genau steuern, an welcher Stelle diese abläuft. Sonst bilden sich Produktgemische, die aufwändig gereinigt werden müssen, und die Ausbeute an dem gewünschten Produkt sinkt.

Es sind zwar schon viele Reaktionen bekannt, die aromatische C–H-Bindungen funktionalisieren. Allerdings verlaufen insbesondere diejenigen, welche die für die weitere Synthese wertvollsten Bausteine einführen (beispielsweise Arylbromide und Arylboronsäuren, kurz Ar–Br bezie-

hungsweise Ar–B$(OH)_2$), an vielen Substraten nicht sehr selektiv. Auf der anderen Seite gibt es zwar höchst selektive C–H-Funktionalisierungsreaktionen, diese können aber meist nur Gruppen anbauen, die synthetisch von geringem Wert sind. Sie eignen sich also nur wenig für weitere Reaktionsschritte.

Unsere Forschungsgruppe hat nun eine Reaktion entwickelt, die sowohl hochgradig selektiv verläuft als auch eine synthetisch wertvolle funktionelle Gruppe einführt: Die »Thianthrenierung« erzeugt am aromatischen Ring einen Thianthrenyl- oder Tetrafluorothianthrenylrest (im Bild rechts grün hervorgehoben). Sie verläuft sehr selektiv, und zwar stets in derjenigen Position, in der die Elektronendichte am höchsten ist.

Kein chemischer Dirigent nötig

Das ist bemerkenswert, denn für die Unterscheidung, welche Position besetzt wird, benötigt man in der Regel einen chemischen Dirigenten – ein Anhängsel am aromatischen Ring. Dieser beeinflusst, an welcher Stelle das reagierende Molekül andockt, indem er die Elektronendichte im Ring verschiebt oder durch seine schiere Größe bestimmte Positionen unzugänglich macht. Ausgehend von der dirigierenden Gruppe unterscheiden Chemiker im Aromaten die ortho-, meta- und para-Position (Bild unten).

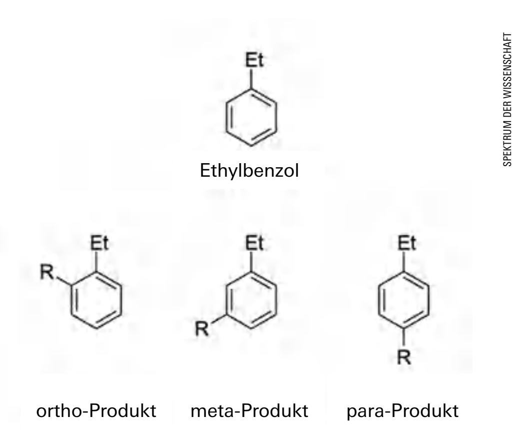
Bei aromatischen Verbindungen, die als einziges Anhängsel eine Elektronen schiebende Gruppe besitzen, setzt sich die Thianthrenylgruppe bevorzugt an die dieser gegenüberliegende, die so genannte para-Position. Um die Selektivität unserer Reaktion an einem einfachen Beispiel zu testen, haben wir die Thianthrenierung von Ethylbenzol (Bild unten) untersucht. Es sind nur wenige Reaktionen bekannt, die an diesem oder ähnlichen Aromaten sehr selektiv ablaufen, da die Ethylgruppe keinen großen Einfluss darauf nimmt, an welcher Stelle die Reaktion stattfindet – sie ist also eher ein schlechter Dirigent. Dennoch erfolgte die Thianthrenierung fast ausschließlich in para-Stellung, und zwar 200-mal so schnell wie in meta- und 500-mal so schnell wie in ortho-Position.

Mit einer derart selektiven Reaktion kann man eine Vielzahl an komplexen Verbindungen, die über mehrere reaktive Positionen verfügen, sehr gezielt um funktionelle Gruppen erweitern. Das Spektrum reicht von elektronenreichen Aromaten wie Dimethoxybenzol bis zu elektronenarmen wie Chlorbenzol. Wir haben Thianthreniumsalze aus insgesamt 15 Pharmawirkstoffen, Agrochemikalien und Naturstoffen beziehungsweise deren Abwandlungen (so genannten Derivaten) erzeugt – ein Beleg dafür, dass auch komplizierte Stoffe umgesetzt werden können. Der Trick liegt darin, dass die Thianthrenylgruppe zum einen die elektronenreichste Position stark bevorzugt und zum anderen positiv geladen ist: Das Zusammenspiel dieser Effekte deaktiviert gewissermaßen den Rest des Moleküls. Ist die Gruppe einmal eingeführt, reagieren die anderen potenziell reaktiven C–H-Bindungen quasi nicht mehr und bleiben erhalten.

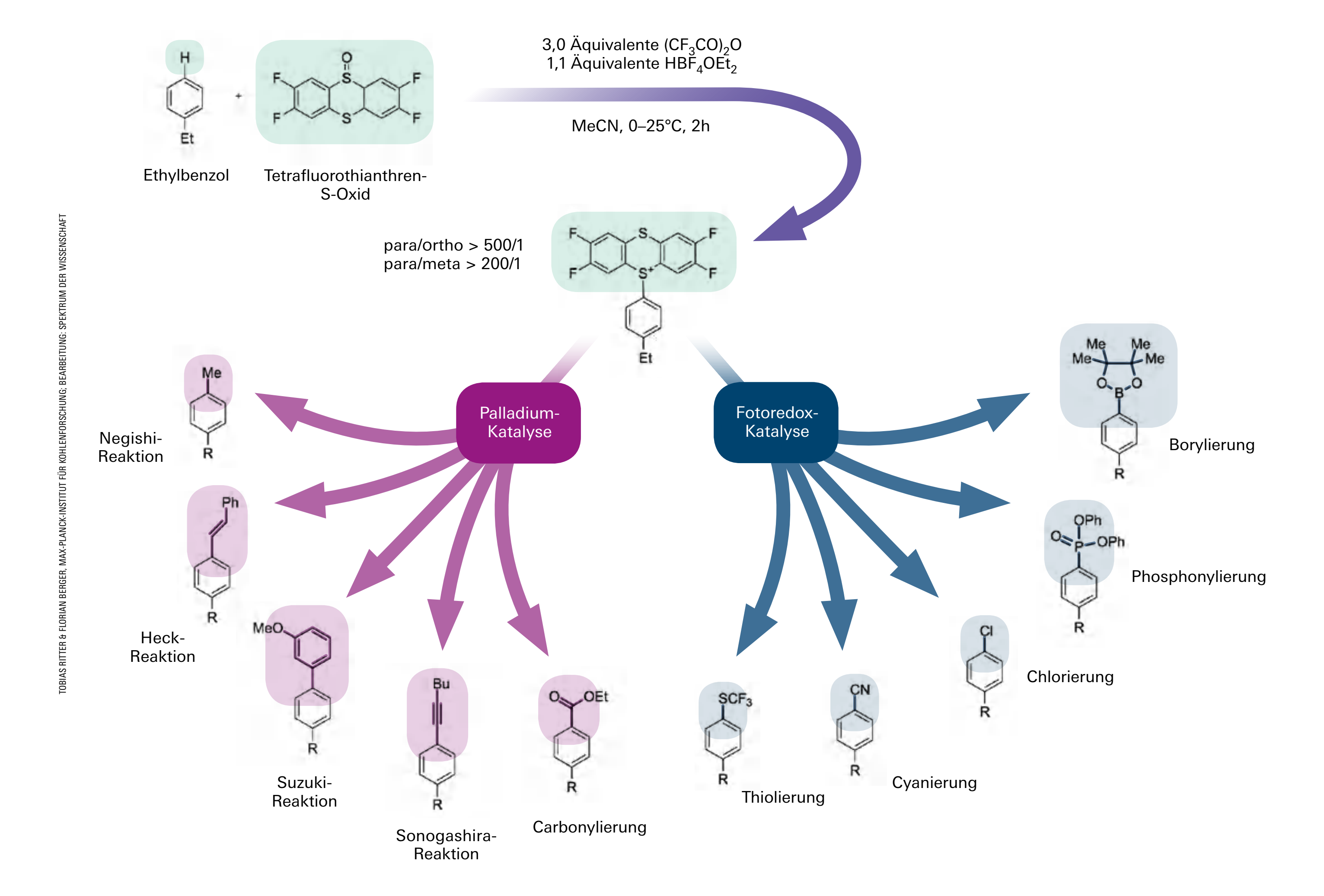
Die Thianthrenierung verläuft hochgradig selektiv: Aus Ethylbenzol und Tetrafluorothianthren-S-Oxid entsteht quasi ausschließlich das para-substituierte Produkt (Mitte). Das so hergestellte Thianthreniumsalz ist in einer Vielzahl weiterer Reaktionen aktiv (rote und blaue Pfeile). Auf diese Weise liefert ein kurzer Syntheseweg zahlreiche funktionelle Gruppen.

Die Thianthrenylgruppe kann in mehreren Folgereaktionen durch viele synthetisch interessante chemische Bausteine ausgetauscht werden. Dadurch ist es möglich, zahlreiche Derivate komplexer Moleküle schnell herzustellen. Besonders gut eignet sie sich für zwei Typen von Folgereaktionen, die Palladium-Katalyse und die Fotoredox-Katalyse – beides Reaktionstypen, die eine große Zahl funktioneller Gruppen einführen können (Bild rechts).

Eine wichtige Sorte palladiumkatalysierter Reaktionen sind beispielsweise die so genannten Kreuzkupplungen. Mit ihrer Hilfe sind Chemiker in der Lage, auch Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen direkt zu knüpfen – sie sind daher inzwischen als entscheidender Schritt in der chemischen und pharmazeutischen Industrie weit verbreitet. 2010 erhielten ihre Entwickler den Chemie-Nobelpreis (siehe Spektrum Dezember 2010, S. 18). In diesen Reaktionen verhält sich der Thianthrenylrest ähnlich wie die bisher eingesetzten Halogene, wie zum Beispiel Bromid. Viele bekannte Reaktionen (wie Suzuki-Kupplung, Sonogashira-Kupplung, Negishi-Kupplung oder Heck-Reaktion) können daher mit Thianthreniumsalzen unter Bedingungen durchgeführt werden, die denen für die Umwandlung mittels Arylbromiden, also Molekülen mit einem Bromatom am aromatischen Ring ähneln. Das ist daher praktisch, weil man die thianthrenierten Moleküle häufig unter bereits bekannten Bedingungen reagieren lassen kann und sich Wissen-



Funktionelle Gruppen am Aromaten (hier eine Ethylgruppe, kurz Et) verschieben die Elektronendichte im aromatischen Ring oder schirmen bestimmte Positionen räumlich ab. So beeinflussen sie, in welcher Position eine weitere Gruppe (R) andockt. Relativ zur ersten funktionellen Gruppe unterscheidet man die ortho-, meta- und para-Position.



TOBIAS RITTER & FLORIAN BERGER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOHLENFORSCHUNG; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schaftler nicht auf die Suche nach neuen Abläufen machen müssen.

Ein weiterer Pluspunkt: Zumindest in der palladiumkatalysierten Suzuki-Kupplung sind Thianthreniumsalze reaktiver als die üblicherweise verwendeten Arylbromide. Nach der Thianthrenierung können diese daher an Kreuzkupplungen teilnehmen, ohne dass die Bromidgruppen dabei Schaden nehmen.

Selektiv und synthetisch wertvoll

Auch durch Verwendung von speziellen, Licht absorbierenden Katalysatoren (den so genannten Fotokatalysatoren) lässt sich ausgehend von Thianthreniumsalzen eine Vielzahl neuer Bindungen knüpfen. Hierbei reduziert der Fotokatalysator das Thianthreniumsalz und spaltet es in Thianthren und Arylradikale auf. Letztere nehmen an vielfältigen Folgereaktionen teil, und so erhält man beispielsweise borylierte oder chlorierte Aromaten. Auf diese Weise kann man funktionelle Gruppen erzeugen, die relevant für die Entwicklung von Pharmaka sein können und sonst schwierig einzuführen sind, wie beispielsweise Cyano- (–CN) oder Trifluoromethylthiogruppen (–SCF_3, siehe Bild oben).

Die Thianthrenierung ist die wahrscheinlich erste C–H-Funktionalisierung, die für eine sehr große Anzahl an Aromaten hochselektiv verläuft, ohne eine bestimmte dirigierende Gruppe zu benötigen, und dabei eine synthetisch wertvolle funktionelle Gruppe einführt. Das könnte insbesondere in der Medizinalchemie viel Zeit für die Synthese neuer Wirkstoffkandidaten sparen. Die derzeit größte Herausforderung ist, dass die während der Umsetzung auftretenden Thianthrenradikale mit vielen oxidationsempfindlichen Molekülen Nebenreaktionen eingehen. Daher arbeiten wir derzeit daran, das Verfahren noch allgemeiner einsetzbar und nützlicher zu machen. ◂

Tobias Ritter ist Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung und entwickelt neue chemische Reaktivität für die organische Synthese. **Florian Berger** war vierfacher Teilnehmer der Internationalen Chemie-Olympiade, hat in Köln Chemie studiert und promoviert seit 2016 am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung über C–H-Funktionalisierung.

QUELLE

Berger, F. et al.: Site-selective and versatile aromatic C–H functionalization by thianthrenation. Nature 567, 2019

WEBLINK

Ein **Video**, in dem die Autoren Schritt für Schritt zeigen, wie die Reaktion im Labor funktioniert, ist unter https://youtu.be/r_KPersmNU8 zu finden.

MEDIZIN
BESTÄRKTE HOFFNUNG AUF DAUERHAFTE AIDSHEILUNG

Zum zweiten Mal wurde ein HIV-Patient offenbar komplett vom Virus befreit. Die Therapiemethode kommt allerdings nicht für alle Betroffenen in Frage.

Zum überhaupt erst zweiten Mal scheint ein HIV-Patient vollständig geheilt worden zu sein. Er litt nicht nur an der Virusinfektion, sondern auch an einem Hodgin-Lymphom, einer Krebserkrankung des Lymphsystems. In seinem Körper finden sich nach einer Strahlentherapie und einer Stammzelltransplantation keinerlei HI-Viren mehr, obwohl die Ärzte um Ravindra Guptra vom University College London ihn nicht mehr mit antiviralen Medikamenten behandeln.

Damit ähnelt der Fall dem des »Berlin-Patienten« Timothy Ray Brown. Dieser hatte im Jahr 2008 eine vergleichbare, aber noch drastischere Behandlung erhalten, die sich sowohl gegen seine Krebserkrankung als auch seine HIV-Infektion richtete und beide erfolgreich zurückdrängte. Beim Londoner Patienten geben sich die Experten einstweilen noch zurückhaltend – es sei trotz aller positiven Zwischenergebnisse zu früh, um bereits jetzt von einem endgültigen Sieg über die Krankheit zu sprechen, mahnen die beteiligten Forscher.

HI-Viren (blau) attackieren eine weiße Blutzelle (rot). Nachträglich eingefärbte, elektronenmikroskopische Aufnahme.

Genmutation verleiht Resistenz

Der HIV-Infizierte hatte eine Knochenmarktransplantation erhalten, um seine Krebserkrankung zu bekämpfen. Als Spenderzellen setzten die Ärzte dabei – wie dies zuvor schon beim Berlin-Patienten geschehen war – die Stammzellen eines Mannes ein, der auf Grund einer seltenen genetischen Veränderung resistent gegen HIV-Infektionen war. Beide Kopien eines Gens namens *CCR5* in den Zellen des Spenders trugen die Mutation Delta-32, die dafür sorgt, dass HI-Viren nicht an das Rezeptorprotein auf weißen Blutzellen andocken können, das von diesem Gen codiert wird.

Bevor sich der Londoner Patient der Knochenmarktransplantation unterzog, hatten die Mediziner seine eigenen Blutstammzellen mit einer Bestrahlung abgetötet. Deren Platz nahmen anschließend die transplantierten Spenderzellen ein und übertrugen dabei ihre HIV-Resistenz auf den Empfänger. Die intensive Strahlentherapie kam nur wegen der Krebserkrankung des Betroffenen in Frage. Auch der Berlin-Patient hatte einige Jahre zuvor wegen seiner Krebserkrankung des Blut bildenden Systems eine Strahlenbehandlung erhalten, allerdings war diese noch aggressiver gewesen. Beim Londoner Patienten genügte ein vergleichsweise mildes Regime, um den Krebs erfolgreich zu bekämpfen. 16 Monate nach der Stammzelltransplantation stoppten die Mediziner die antivirale Therapie. In den darauf folgenden eineinhalb Jahren traten keine Symptome einer HIV-Infektion mehr auf.

Dies sei durchaus ein ermutigendes Zeichen, kommentiert der Virologe Hans-Georg Kräusslich vom Universitätsklinikum Heidelberg. Denn bei HIV-Patienten tauchten nach dem Absetzen der antiviralen Medikamente sonst meist schon nach wenigen Wochen wieder viele neue Viren auf. Ein endgültiger Beweis für den Erfolg der Therapie stehe beim Londoner Patienten allerdings noch aus. Zur Vorsicht gemahne etwa der Fall des so genannten Mississippi-Babys, bei dem noch 27 Monate nach Therapieende keine Viren mehr nachweisbar gewesen seien, das Virus anschließend jedoch wieder aufgetreten sei, so Kräusslich gegenüber dem Science Media Center.

Der Berlin-Patient von 2008 gilt zwar als geheilt, bisher war aber

umstritten, ob er einen speziellen Einzelfall darstellt. Manche bezweifelten daher, dass sich seine erfolgreiche Behandlung auf andere Betroffene übertragen lasse. Der Londoner Fall scheine jedoch dafür zu sprechen, sagt Gero Hütter von der Cellex GmbH, der den Berlin-Patienten damals an der Charité als behandelnder Arzt begleitet hat.

Stammzelltransplantationen sind nicht immer erfolgreich

Anfang März dieses Jahres berichtete das Universitätsklinikum Düsseldorf von einem weiteren Patienten mit ähnlicher Konstellation. Der Düsseldorfer HIV-Patient erhielt auf Grund einer Leukämie-Erkrankung eine Stammzelltransplantation und wird seit Ende 2018 nicht mehr mit antiviralen Medikamenten behandelt. Seither seien keine HI-Viren mehr bei ihm nachweisbar, so das Universitätsklinikum. Da die Arzneistoffe aber erst seit Kurzem abgesetzt seien, ließe sich noch nichts Abschließendes über eine mögliche Heilung aussagen.

Mehrere Fälle belegen indes, dass Stammzelltransplantationen eine HIV-Infektion nicht immer zurückdrängen. Die Fachzeitschrift »Nature« verweist auf einen HIV-Patienten aus Essen, der nach einer solchen Zellverpflanzung einen Rückfall der Erkrankung erlitt. Bei ihm hatte sich ein mutierter Erregerstamm entwickelt, der weiße Blutzellen auch ohne das Rezeptorprotein CCR5 befallen kann und deshalb von Mutationen in dessen Gen nicht gestoppt wird. Bei anderen Erkrankten, die Stammzellen mit intakten CCR5-Rezeptorproteinen übertragen bekamen, kehrte die Infektion ebenfalls zurück, heißt es in »Nature«.

Eine intensive Bestrahlung mit darauf folgender Stammzelltherapie könne man ohnehin nicht allen HIV-Patienten zumuten, betont Hütter, sondern nur solchen mit einer zusätzlichen Krebserkrankung. Die derzeit übliche Behandlung von HIV-Infizierten mit antiviralen Medikamenten bewirke zwar keine Heilung, verbessere aber die Prognose deutlich.

Jene Fälle, in denen sich eine HIV-Infektion mit Hilfe veränderter *CCR5*-Gene erfolgreich zurückdrängen ließ, rücken diesen Erbfaktor verstärkt in den Fokus von Forschern, die Ansatzpunkte für neue Therapiemethoden suchen. Mutationen in dieser Erbanlage kommen bei einigen Menschen natürlich vor, die dadurch weitgehend resistent gegen entsprechenden Virenbefall sind. Bei ihnen sorgt ein fehlendes DNA-Stück in beiden Kopien des Gens dafür, dass auf den weißen Blutzellen nur eine verstümmelte und funktionslose Variante des Rezeptorproteins CCR5 sitzt. Viren des am häufigsten auftretenden Typs HIV-1 können solche Zellen nicht infizieren. Bei rund zehn Prozent aller Europäer – übrigens auch beim Londoner Patienten – ist immerhin eine der beiden Kopien von *CCR5* derart verändert; ihre Zellen tragen daher weniger funktionsfähige CCR5-Rezeptoren als im Fall zweier intakter Genkopien, was das Fortschreiten der Infektion zumindest verlangsamt.

Verschiedene Forschergruppen arbeiten daran, das Gen *CCR5* gezielt zu verändern, um sein Proteinprodukt, den gleichnamigen Rezeptor, als Eingangspforte für die Viren zu verschließen. Zuletzt hatte der chinesische Forscher He Jiankui diese Erbanlage im Genom menschlicher Embryonen bei einem skandalträchtigen Menschenversuch mit Hilfe des CRISPR-Cas-Verfahrens modifiziert. Auch bei ethisch und wissenschaftlich weniger problematischen Experimenten besteht die größte Herausforderung darin, *CCR5* so umzugestalten, dass es zwar HIV-Infektionen unterbindet, aber trotzdem seine bisher noch nicht völlig verstandene natürliche Funktion weiter erfüllen kann. Vermutlich spielt das Rezeptorprotein in Nervenzellen eine wichtige Rolle bei Gedächtnis- und Lernprozessen. ◂

Jan Osterkamp ist Redakteur bei »Spektrum.de«, **Frank Schubert** bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Gupta, R.K. et al.: HIV-1 remission following CCR5Δ32/Δ32 haematopoietic stem-cell transplantation. Nature 568, 2019

Hütter, G. et al.: Long-term control of HIV by CCR5 Delta32/Delta32 stem-cell transplantation. New England Journal of Medicine 360, 2009



SPRINGERS EINWÜRFE
BILANZ DER ENERGIEGEWINNUNG

Um natürliche Energiequellen zu erschließen, müssen wir viel technischen Aufwand treiben. Das schlägt sich in den laufenden Kosten nur teilweise nieder.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1654752

Kohle, Öl und Gas haben gut zwei Jahrhunderte lang die Industrialisierung der ganzen Welt angetrieben, und noch heute stillen sie den Löwenanteil des globalen Energiebedarfs. Allerdings stößt die Nutzung der fossilen Quellen an Grenzen: Die natürlichen Reserven sind nicht unerschöpflich, ihre Förderung wird immer aufwändiger, und die konventionelle Energiegewinnung reichert die Atmosphäre mit Kohlendioxid an.

Die klimaneutralen Alternativen Wasser, Wind und Sonne sind zwar an sich unerschöpflich, haben es aber gegen die alteingesessenen Energieträger schwer. Nicht überall und nicht immer strömt Wasser, weht Wind, scheint die Sonne; und mit der über Jahrmillionen hinweg in Kohle und Öl leicht zugänglich gespeicherten Energie können die Erneuerbaren oft nur schlecht mithalten.

Ist die Energiewende also rechnerisch ein Verlustgeschäft, auf das sich die Wirtschaft bloß unter moralisch-politischem Druck einlässt? Dafür scheinen so genannte Nettoenergie-Analysen zu sprechen. Sie ermitteln die energetische Rendite (energy return on investment, EROI). Die Zahl steht für das Verhältnis der in einer geförderten Brennstoffmenge vorhandenen Energie zu dem für ihre Erschließung nötigen Aufwand. Beispielsweise bedeutet ein EROI von 10, dass man zehnmal so viel Energie gewinnt, wie man investiert. Das entspricht dem Wert einer kostspielig hergestellten Hightech-Fotovoltaikanlage – auf den ersten Blick keine gute Bilanz gegenüber der rund zehnfach höheren Rendite einer sprudelnden Erdölquelle.

Doch gegen diese Rechnung legt der Nachhaltigkeitsforscher Marco Raugei von der Oxford Brookes University gut begründeten Protest ein. Sobald man die energetischen Kosten für Raffinierung und Transport des Öls bis zum Endverbraucher mit einrechnet – sie verstecken sich wohl teilweise in den massiven Steueranteilen des Benzinpreises –, fällt der Vergleich ganz anders aus: Die Rendite des Öls schrumpft von 100 auf unter 10 und liegt damit durchaus im Bereich der Fotovoltaik, die ja gleich direkt nutzbaren Strom liefert *(Nature Energy 4, S. 86–88, 2019)*.

Ist die Energiewende ein Verlustgeschäft?

Der Physiker und Wissenschaftsautor Mark Buchanan listet die energetische Rendite weiterer Energieformen auf, jeweils gemittelt über mehrere Jahrzehnte *(Nature Physics 15, S. 520, 2019)*. Der Strom aus Windenergie kommt demnach immerhin auf 18, hingegen bringen Biokraftstoffe kaum 5. Ein spezieller, da politisch heiß umstrittener Fall ist die Kernenergie; hier streuen die Werte für die Energierendite je nach Zählmethode zwischen 1 und 90. In einer Metastudie über all diese Schätzungen kam Physiker Manfred Lenzen von der University of Sydney in Australien schon 2008 auf eine nuklearenergetische Rendite von rund 5, indem er den gesamten Brennstoffzyklus berücksichtigte, inklusive der sicheren Lagerung der radioaktiven Abfälle *(Energy Conversion and Management 49, S. 2178–2199, 2008)*.

Buchanan vermutet, die Energiegewinnung dürfte künftig nicht einfacher werden, und rechnet damit, dass sich die energetischen Renditen bei 5 oder gar 3 einpendeln. Das bedeutet: Bald würden ein Fünftel oder sogar ein Drittel der produzierten Energie von der Energiewirtschaft selbst verbraucht, anstatt der Gesamtwirtschaft zugutezukommen. Entsprechend könnte sich die Energie insgesamt verknappen und verteuern. Deshalb gehört die Zukunft denjenigen Technologien, die einen besonders sparsamen Verbrauch von flexibel nutzbaren Energieformen wie Strom versprechen.



EVOLUTION
DER UNWAHRSCHEINLICHE TRIUMPH DER DINOSAURIER

War den Dinosauriern die Vorherrschaft im Erdmittelalter quasi vorbestimmt? Neue Fossilien und Analysen zeichnen ein anderes Bild: Der Anfang der »schrecklichen Echsen« verlief vermutlich viel bescheidener.

Während sich im Hintergrund *Dromomeron*, ein Vorfahr der Dinosaurier, vorsichtig einem See nähert, liegt das riesige krokodilähnliche Amphib *Koskinonodon* schon auf der Lauer nach Beute. Eine Szene wie diese war vor 212 Millionen Jahren auf dem Gebiet der heutigen Ghost Ranch im US-Bundesstaat New Mexico möglicherweise alltäglich.

JAMES GURNEY / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2018

JAMES GURNEY / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2018



Stephen Brusatte ist promovierter Paläontologe an der University of Edinburgh (Großbritannien). Seit seinem Studium beschäftigt sich der 1984 geborene US-Amerikaner mit der Evolution der Dinosaurier und hat bereits mehrere Spezies wissenschaftlich beschrieben. Dies ist sein vierter **Spektrum**-Artikel.

spektrum.de/artikel/1654756

Um die Jahrtausendwende, als ich mich als Teenager zum ersten Mal für Fossilien begeisterte, baute das Field Museum in Chicago sein *Brachiosaurus*-Skelett ab und stellte dafür einen *Tyrannosaurus rex* auf. Damit wurde eine Dinosaurierikone gegen eine andere ausgetauscht: Der Pflanzen fressende Koloss, der einst das Gewicht von mehr als zehn Elefanten auf die Waagschale gebracht hatte und dessen Hals sich in einem eleganten Bogen weit über die Zuschauergalerie im zweiten Stock des Museums erstreckte, musste weichen. An seine Stelle trat das größte Landraubtier aller Zeiten – eine Bestie von den Ausmaßen eines Omnibusses, die einst mit ihren Zähnen, so groß wie Eisenbahnnägel, die Knochen ihrer Beute zermalmt hatte.

Diese Tiere beflügelten meine Fantasie. Ich besuchte sie, so oft ich meine Eltern überreden konnte, die mehr als 100 Kilometer lange Autofahrt nach Chicago zu unternehmen. Unter den riesigen Skeletten zu stehen, war berauschend: Ihre Größe, ihre Kraft, ihr Körper erschienen so fremdartig im Vergleich zu allen heute lebenden Tieren. Kein Wunder, dass sie mehr als 150 Millionen Jahre lang die Erde beherrschten; sie waren einfach großartig.

Aber wie schafften die Dinosaurier das? Über diese Frage dachte ich in meinem jugendlichen Elan kaum nach. So wie ich mir nicht richtig vorstellen konnte, dass meine Eltern auch einmal so jung waren wie ich, so ging ich einfach davon aus, dass die Dinosaurier irgendwann in ferner Vergangenheit als Riesen mit langem Hals und spitzen Zähnen auf der Bildfläche erschienen waren. Damals wusste ich noch nicht, dass ich damit ziemlich nah bei der Meinung lag, die dazu während des späten 20. Jahrhunderts in der Wissenschaft vorherrschte: Die Dinosaurier, so die allgemeine Ansicht, waren etwas Besonderes – ausgestattet mit überragender Stärke, Gewandtheit und Geschwindigkeit, so dass sie ihre anfänglichen Rivalen leicht überwanden und rasch ihre Herrschaft über die ganze Erde ausbreiteten.

In den vergangenen 15 Jahren jedoch erschütterten eine Fülle an weltweit entdeckten Fossilien, neue Erkenntnisse über die Umweltbedingungen der ersten Dinosaurier sowie verbesserte evolutionsbiologische Verfahren diese Vorstellung. Damit kristallisierte sich eine ganz andere Geschichte heraus: Der Aufstieg der Dinosaurier vollzog sich allmählich, und die ersten 30 Millionen Jahre ihrer Existenz verweilten sie in wenigen Winkeln der Erde im Schatten anderer Tiere. Erst dank einiger glücklicher Zufälle begann ihr großer Aufschwung.

Wie viele erfolgreiche Lebewesen, so entsprangen auch die Dinosaurier einer Katastrophe: Vor 252 Millionen Jahren, am Ende der Permzeit, rumorte unterhalb des heutigen

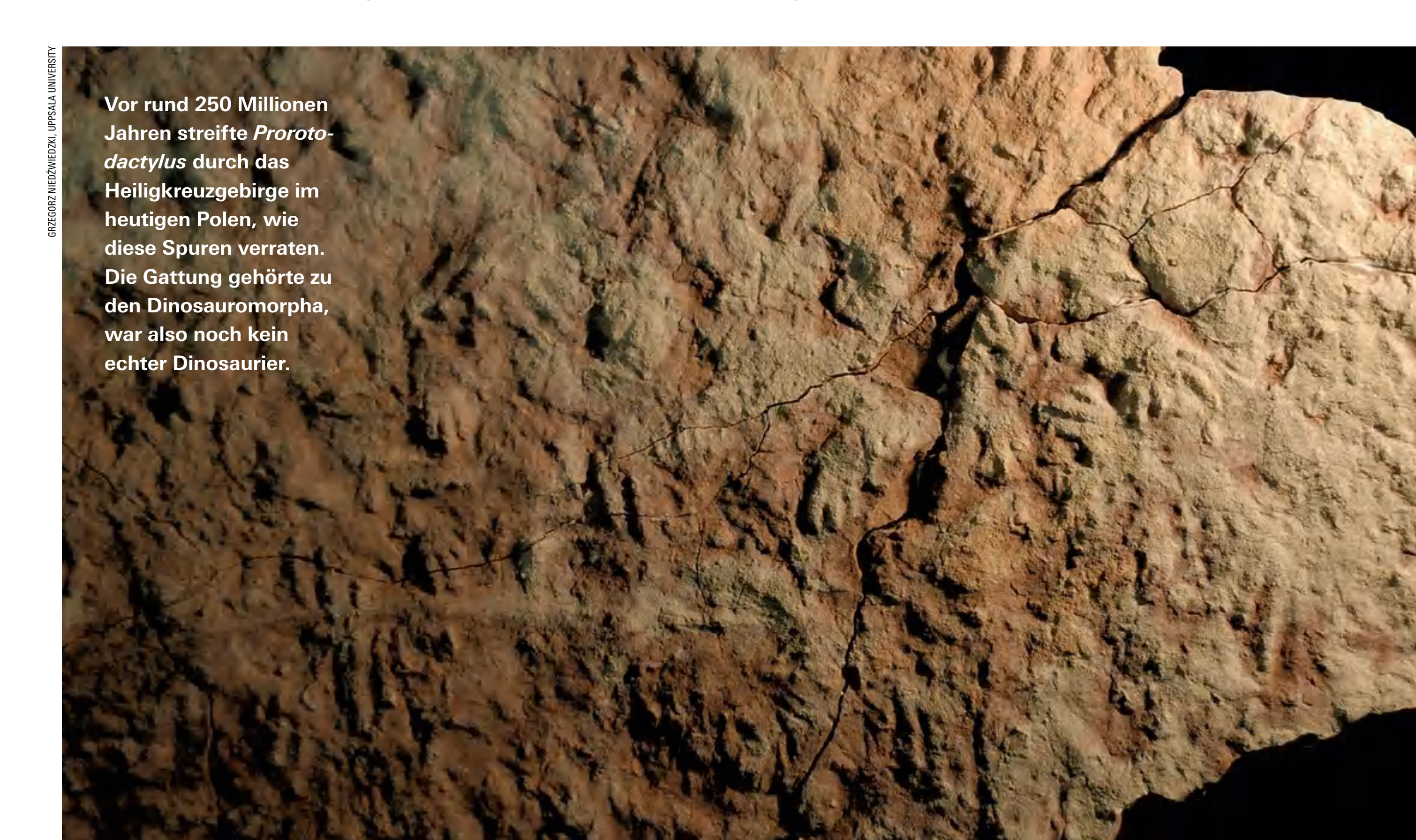
Sibirien ein Magmasee. Die hier lebende Tierwelt – eine exotische Mischung aus großen Amphibien, runzeligen Reptilien sowie Fleisch fressenden Vorläufern der Säugetiere – ahnte nichts von dem drohenden Unheil. Ströme aus flüssigem Gestein drangen durch Erdmantel und Erdkruste nach oben und brachen aus kilometerbreiten Rissen an der Erdoberfläche hervor. Die Eruptionen hielten einige hunderttausend, wenn nicht gar Millionen Jahre an und spien Hitze, Staub, Giftgase sowie Massen an Lava aus, die etliche Millionen Quadratkilometer der asiatischen Landschaft unter sich begruben. Die Temperaturen schossen in die Höhe, die Ozeane versauerten, die Ökosysteme kollabierten und bis zu 95 Prozent aller biologischen Arten starben aus. Die Katastrophe am Ende des Perm ging als das schlimmste Massenaussterben in die Erdgeschichte ein. Nur eine Hand voll Organismen schaffte es in die nächste geologische Periode: die Trias. Als die Vulkane sich beruhigten und die Ökosysteme sich stabilisierten, fanden die Überlebenden um sich herum eine mehr oder weniger leere Welt vor. Unter ihnen waren verschiedene kleine Amphibien sowie Reptilien, die sich nun allmählich auseinanderentwickelten und die heutigen Frösche, Salamander, Schildkröten, Echsen und Säugetiere hervorbringen sollten.

Wissenschaftler kennen diese Tiere durch Fußabdrücke, die sie in aufeinander folgenden Sedimentschichten im Heiligkreuzgebirge im heutigen Polen hinterlassen haben. Grzegorz Niedzwiedzki, der in der Gegend aufwuchs und inzwischen als Paläontologe an der schwedischen Universität Uppsala forscht, sammelt seit mehr als 20 Jahren solche fossilen Spuren, und mitunter durfte ich ihn dabei begleiten. 2005 stieß er an einem schmalen, von Brombeergestrüpp überwucherten Bach in der Nähe des Dorfs Stryczowice auf ungewöhnliche Spuren, die zu keiner der bekannten Reptilien- und Amphibiengruppen passen wollten. Die seltsamen, etwa katzenpfotengroßen Abdrücke bildeten schmale Fährten, wobei die fünffingrigen Vorderfüße sich vor den etwas größeren hinteren Extremitäten positionierten, deren drei längere mittlere Zehen beiderseits von jeweils einem Zehenstummel flankiert waren. Die Verursacher der Spuren tragen heute den Gattungsnamen *Prorotodactylus*. Alles, was wir über dieses Wesen wissen, verdanken wir seinen Abdrücken (siehe Bild unten) – Fossilien des Tiers selbst sind unbekannt.

Noch kein echter Dinosaurier

Mit einem Alter von ungefähr 250 Millionen Jahren entstanden die Spuren von *Prorotodactylus* nur eine oder zwei Millionen Jahre nach den Vulkanausbrüchen, die das Perm beendeten. Der geringe Abstand zwischen linker und rechter Spur machte von Anfang an klar, dass sie zu einer spezialisierten Reptiliengruppe gehörten: den Archosauriern. Diese Tiere entstanden nach dem Massenaussterben des Perm und entwickelten eine aufrechte Körperhaltung, dank derer sie schneller und weiter laufen und somit ihre Beute leichter verfolgen konnten. Da die Spuren von einem frühen Archosaurier stammten, könnten sie Fragen nach dem Ursprung der Dinosaurier beantworten. Nahezu unmittelbar nach ihrer Entstehung bildeten die Archosaurier zwei Abstammungslinien, die während der ganzen Triaszeit in einem evolutionären Rüstungswettlauf verstrickt blieben: Auf der einen Seite standen die Pseudosuchia, aus der unter anderem die heutigen Krokodile hervorgingen, und auf der anderen die Avemetatarsalia, die sich zu den Dinosauriern weiterentwickelten. Zu welchem Zweig gehörte *Prorotodactylus*?

Das wollte ich zusammen mit Niedzwiedzki und Richard Butler, heute an der englischen University of Birmingham, herausfinden. Unsere 2011 veröffentlichte Analyse offenbarte einige Besonderheiten der Fußabdrücke, die sie mit charakteristischen Merkmalen von Dinosaurierfüßen teilen: die Anordnung der Knochen, bei der nur die Zehen beim Laufen



GRZEGORZ NIEDŹWIEDZKI, UPPSALA UNIVERSITY

Vor rund 250 Millionen Jahren streifte *Prorotodactylus* durch das Heiligkreuzgebirge im heutigen Polen, wie diese Spuren verraten. Die Gattung gehörte zu den Dinosauromorpha, war also noch kein echter Dinosaurier.

den Boden berühren, sowie den schmalen Fuß mit drei großen Zehen. Demnach gehörte *Prorotodactylus* zu den Dinosauromorpha. Er war also noch kein richtiger Dinosaurier, aber ein primitives Mitglied des Zweigs der Avemetatarsalia, der auch die Dinosaurier und ihre engsten Verwandten umfasst. Die Angehörigen dieser Gruppe besaßen einen langen Schwanz, große Beinmuskeln und zusätzliche Knochen an den Hüften, die das Bein mit dem Rumpf verbanden und sie damit in die Lage versetzen, sich schneller und effizienter zu bewegen als andere Archosaurier.

Diese ersten Dinosauromorpha wirkten alles andere als Furcht erregend. Sie waren nur ungefähr so groß wie eine Hauskatze und liefen auf langen, dünnen Beinen. Es gab auch nicht sehr viele von ihnen: In Stryczowice gehören noch nicht einmal fünf Prozent aller Fußspuren zu *Prorotodactylus*. Viel zahlreicher tauchen Spuren kleiner Reptilien, Amphibien sowie anderer Archosaurier auf. Die Zeit der Dinosauromorpha war noch nicht gekommen.

Im Lauf der nächsten 10 bis 15 Millionen Jahre entwickelten sich die Dinosauromorpha weiter auseinander. Funde aus dieser Zeit offenbaren zunächst in Polen und dann weltweit eine zunehmende Zahl verschiedenartiger Abdrücke. Die Spuren werden größer und entwickeln eine höhere Formenvielfalt. In manchen Fährten zeigen sich keine Handabdrücke mehr – die Tiere liefen demnach ausschließlich auf den Hinterbeinen. Nun tauchen auch Skelette auf. Dann, irgendwann vor 230 bis 240 Millionen Jahren, entwickelten sich einige dieser primitiven Dinosauromorpha zu echten Dinosauriern. Radikal verändert hat sich dabei aber nur der Name – der Übergang selbst bestand aus wenigen, geringfügigen anatomischen Neuerungen: Ein langer Vorsprung am Oberarm diente als Verankerung für größere Muskeln, vorstehende Platten an den Halswirbeln stützten stärkere Bänder, und ein offenes, fensterähnliches Gelenk zwischen Oberschenkel und Becken stabilisierte die aufrechte Körperhaltung. Aber so bescheiden diese Veränderungen aussehen, sie kennzeichnen den Beginn einer großen Entwicklung.

Die ersten Fossilien, die sich eindeutig als Dinosaurier klassifizieren lassen, sind ungefähr 230 Millionen Jahre alt und stammen aus den bizarr anmutenden Landschaften des Naturreservats Ischigualasto in Argentinien. Hier suchen Wissenschaftler schon seit Jahrzehnten Fossilien, wie der legendäre US-amerikanische Paläontologe Alfred Romer (1894–1973) in den 1950er Jahren oder die argentinischen Wissenschaftler Osvaldo Reig (1929–1992) und José Bonaparte (* 1928) in den 1960er Jahren. In den 1980er und 1990er Jahren leiteten Paul Serreno von der University of Chicago und Ricardo Martínez von der argentinischen Universidad Nacional de San Juan weitere Expeditionen in das Ischigualasto-Reservat. Sie stießen hier auf Fossilien von *Herrerasaurus*, *Eoraptor* und anderen Kreaturen, die alle drei Hauptäste der Dinosaurier repräsentieren: den Fleisch fressenden Theropoda, den Pflanzen fressenden Sauropodomorpha mit ihrem langen Hals sowie den ebenfalls vegetarischen Vogelbeckensauriern oder Ornithischia, die einen Schnabel besaßen (siehe »Familienfehde«, S. 34/35).

In der mittleren Phase der Trias, etwa vor 230 bis vor 220 Millionen Jahren, erlebten diese drei wichtigen Dinosauriergruppen ihren Aufschwung und gründeten in einer uns fremdartig vorkommenden Welt ihre eigenen Familien. Damals erstreckte sich von Pol zu Pol ein einziger Superkontinent namens Pangäa, der von dem globalen Ozean Panthalassa umgeben war. Ein behaglicher Ort sieht anders aus. Insgesamt war es auf der Erde viel wärmer als heute, und am äquatornahen Zentrum Pangäas herrschte sommers sengende Hitze, während sich die andere Hälfte der Landfläche im Winter deutlich abkühlte. Diese ausgeprägten Temperaturunterschiede führten zu heftigen »Megamonsunen«, die Pangäa in Umweltzonen mit jeweils unterschiedlichen Niederschlags- und Windverhältnissen unterteilten: eine unerträglich heiße und feuchte Äquatorregion, beiderseits flankiert von subtropischen Wüsten, an denen die etwas kühleren und viel feuchteren Regionen der mittleren Breiten angrenzten.

AUF EINEN BLICK
GLÜCK IN DER EVOLUTIONSLOTTERIE

1. Nach herkömmlicher Sichtweise überflügelten die Dinosaurier ihre Konkurrenz dank ihrer Überlegenheit an Schnelligkeit, Stoffwechsel sowie Intelligenz und breiteten sich daher rasch über die ganze Erde aus.

2. Neue Fossilien und Analysen stellen dieses Szenario in Frage. Demnach spielten die Dinosaurier über Jahrmillionen nur eine unbedeutende Nebenrolle.

3. Erst nachdem ihre stärksten Konkurrenten, die Vorläufer der Krokodile, am Ende der Trias weitgehend verschwanden, begann der Siegeszug der »schrecklichen Echsen«.

Ein Massengrab von riesigen Amphibien – aber kein einziger Dinosaurier

Herrerasaurus, *Eoraptor* und die anderen Dinosaurier von Ischigualasto hatten sich in den vergleichsweise angenehmen mittleren Breiten niedergelassen. Das Gleiche taten ihre Entsprechungen in Brasilien und Indien, die wir aus neu entdeckten Fossilien kennen. Aber wie sah es in den anderen Teilen des Superkontinents aus? Waren die frühen Dinosaurier in der Lage, auch diese unwirtlicheren Regionen zu besiedeln, wie es bislang angenommen wurde? Um die Hypothese zu überprüfen, taten Butler und ich uns 2009, wenige Monate nach unserem ersten gemeinsamen Ausflug nach Polen, mit Octávio Mateus vom portugiesischen Museu da Lourinhã zusammen. Wir wollten in einem Überrest des subtropischen trockenen Landschaftsgürtels im Norden Pangäas, der im heutigen Südportugal liegt, Dinosaurier finden – und stießen stattdessen auf ein Massengrab mit Hunderten von autogroßen Amphibien, die wir *Metoposaurus algarvensis* nannten. Diese Beherrscher der Süßgewässer der Trias waren wohl zu Opfern des launischen Wetters von Pangäa geworden, das ihre Seen austrocknen ließ. Als wir später die Knochenlagerstätte ausgru-

Familienfehde

Die vielleicht hitzigste Debatte der modernen Dinosaurierforschung dreht sich um die Frage, wie Theropoda, Sauropodomorpha und Ornithischia im Stammbaum angeordnet sind. Der britische Anatom Harry Govier Seeley (1839–1909) unterteilte 1887 die Flut der in Europa und dem amerikanischen Westen gefundenen Fossilien auf Grund der Form ihrer Hüftknochen in zwei Ordnungen: Bei den Theropoda und Sauropodomorpha weist das Schambein wie bei den heutigen Echsen nach vorn; Seeley gruppierte sie daher zur Ordnung Saurischia oder Echsenbeckensaurier. Hiervon trennte er die Ornithischia oder Vogelbeckensaurier ab, deren Schambein wie bei den heutigen Vögeln nach hinten gerichtet ist. Diese grundlegende Zweiteilung gilt bis heute als Standardeinteilung der Dinosaurier, die ich wie alle meine Dinosaurier sammelnden Kollegen als Student gelernt habe (obere Grafik).

Sie könnte aber falsch sein. 2017 schlug eine in der Fachzeitschrift »Nature« erschienene Studie wie eine Bombe ein: Darin präsentierte der Doktorand Matthew Baron von der University of Cambridge mit seinen Kollegen nach der Auswertung eines umfangreichen Datenbestands über die anatomischen Merkmale früher Dinosaurier einen neuen Stammbaum. Er fasst die Theropoden und Ornithischia zu einer Gruppe namens Ornithoscelida zusammen, von denen sich die Sauropodomorpha auf einem eigenen Ast abgrenzen. Demnach lautet die Zweiteilung der Dinosaurier also nicht mehr Saurischia versus Ornithischia, sondern Ornithoscelida versus Sauropodomorpha (untere Grafik).

Oder auch nicht. Kurz nach der Veröffentlichung von Barons Studie kontaktierte mich Max Langer, ein brasilianischer Paläontologe, der in den letzten zehn Jahren eine ganze Reihe Dinosaurier und ihre Vorläufer aus seinem Heimatland beschrieben hatte. Er stand dem neuen Stammbaum skeptisch gegenüber und stellte eine Gruppe von Experten für frühe Dinosaurier zusammen, zu der ich ebenfalls gehören sollte, um über Barons Daten zu brüten. Einen Monat lang gingen wir sorgfältig die Daten durch und hielten an verschiedenen Stellen fest, wo wir die Interpretation der anderen Arbeitsgruppe bezweifelten. Dann analysierten wir die Merkmale mit unseren Korrekturen erneut. Dabei kristallisierte sich wieder ein Stammbaum heraus, in dem Saurischia und Ornithischia einander gegenüberstanden; statistische Prüfungen zeigten allerdings, dass diese Anordnung nicht signifikant besser zu den Daten passte als Barons Stammbaum mit Ornithoscelida und Sauropodomorpha.

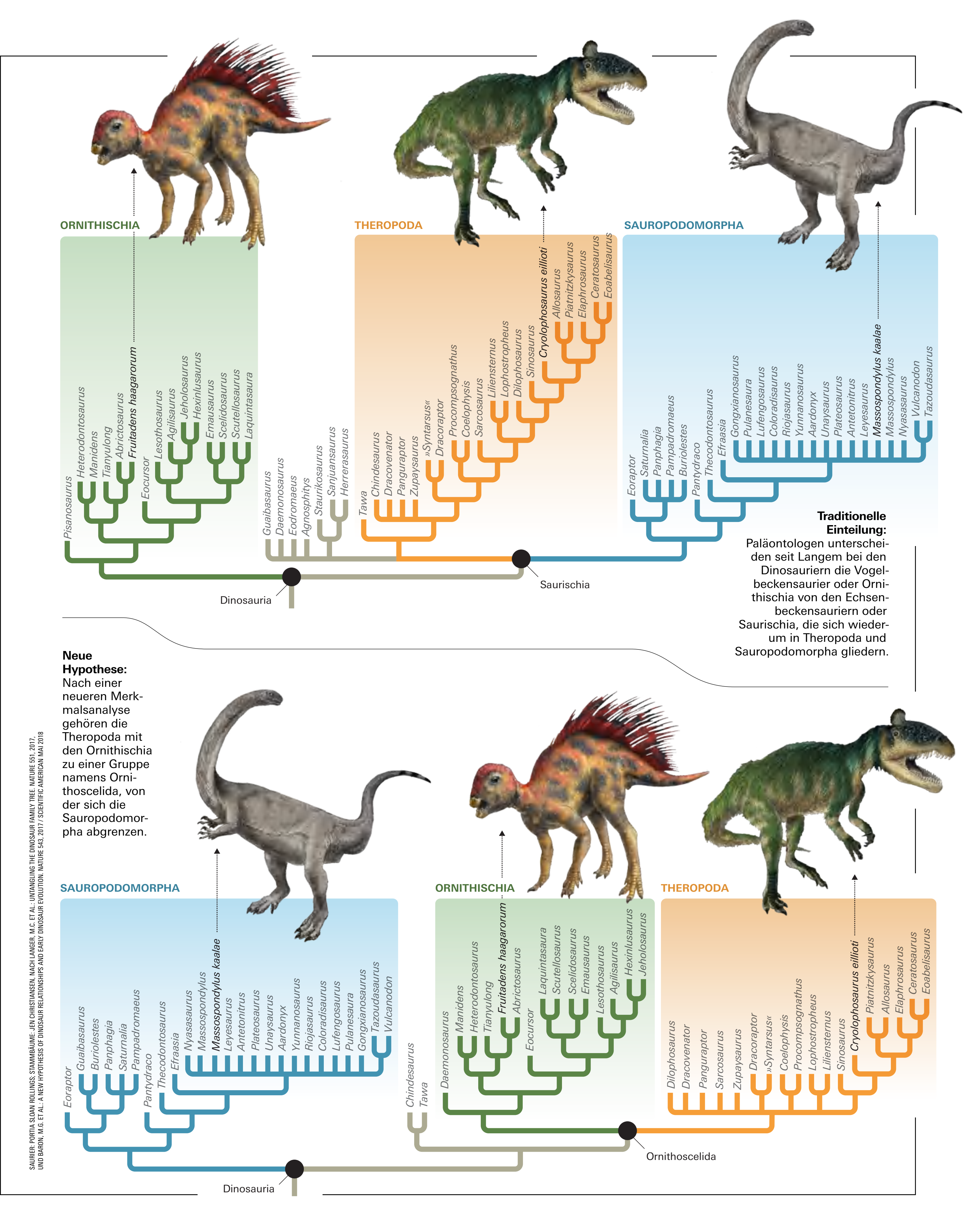
Wegen dieser zweideutigen Forschungsergebnissen fehlt den Paläontologen bislang ein grundlegendes Verständnis für die Aufspaltung der frühen Dinosaurier. Die Fülle neuer Entdeckungen aus Argentinien, Brasilien, Polen und anderen Ländern im Lauf der letzten 15 Jahre haben das Bild eher noch verschwommener gemacht. Wie wir heute wissen, ähnelten sich die ersten Mitglieder der drei großen Dinosaurierlinien in Körpergröße und Anatomie frappierend, was die Aufklärung ihrer Verwandtschaftsbeziehungen erschwert. Dieses Rätsel werden wohl erst künftige Paläontologen lösen, und zwar vermutlich auf dem gleichen Weg, auf dem solche Meinungsverschiedenheiten in der Regel beigelegt werden: mit neuen Fossilien.

ben, fanden wir auch Fossilien von verschiedenen Fischen, pudelgroßen Reptilien sowie von Archosauriern, aus denen sich die Krokodile entwickeln sollten. Aber bis heute entdeckten wir nicht das kleinste Stückchen eines Dinosaurierknochens.

Vermutlich wird das nie geschehen. Fossilfundstätten aus der gleichen Zeit von vor 220 bis 230 Millionen Jahren in Spanien, Marokko sowie an der nordamerikanischen Ostküste zeigen das gleiche Bild, das wir aus Portugal kennen: eine Fülle von Amphibien und Reptilien, aber keinen einzigen Dinosaurier. All diese Orte lagen in der Trockenregion von Pangäa. Offensichtlich hatten sich die Dinosaurier in den entscheidenden Jahren ihrer Evolution in feucht-gemäßigten Regionen langsam auseinanderentwickelt, blieben aber unfähig, die Wüsten zu besiedeln. Das stellt eine unerwartete Erkenntnis dar: Die Dinosaurier erwiesen sich keineswegs als die überlegenen Lebewesen, die sich unmittelbar nach ihrer Entstehung in einer Welle über ganz Pangäa verbreiteten. Vielmehr kamen sie mit der Hitze nicht zurecht. Geografisch eingeschränkt, agierten sie als bloße Nebendarsteller in einem weltweiten Drama, dessen Schauplatz sich noch immer von dem großen Artensterben am Ende des Perm erholen musste.

Aber dann, gerade als es so aussah, als könnten die Dinosaurier nie ihre eingefahrenen Gleise verlassen, traten zwei für sie glückliche Wendungen ein. Erstens gingen die beherrschenden großen Pflanzenfresser jener Zeit – Reptilien namens Rhynchosaurier und die mit den Säugetieren verwandten Dicynodonten – in der feucht-warmen Zone zurück; in manchen Regionen verschwanden sie aus unbekannten Gründen sogar ganz. Dieser Sturz in die Bedeutungslosigkeit vor rund 220 Millionen Jahren bot primitiven, Pflanzen fressenden Sauropodomorpha wie *Saturnalia* – eine hundegroße Gattung mit etwas verlängertem Hals – die Gelegenheit, eine wichtige ökologische Nische zu besetzen. Es dauerte nicht lange, bis diese Sauropodenvorläufer zu den vorherrschenden Pflanzenfressern in den feuchten Regionen der Nord- und Südhalbkugel avancierten.

Zweitens drangen die Dinosaurier vor etwa 215 Millionen Jahren endlich in die Wüsten der Nordhalbkugel vor. Mög-



Traditionelle Einteilung: Paläontologen unterscheiden seit Langem bei den Dinosauriern die Vogelbeckensaurier oder Ornithischia von den Echsenbeckensauriern oder Saurischia, die sich wiederum in Theropoda und Sauropodomorpha gliedern.

Neue Hypothese: Nach einer neueren Merkmalsanalyse gehören die Theropoda mit den Ornithischia zu einer Gruppe namens Ornithoscelida, von der sich die Sauropodomorpha abgrenzen.



In der Trias waren die Dinosaurier eine unbedeutende Gruppe im Schatten von Krokodilverwandten wie dem bis zu neun Meter langen *Saurosuchus* (oben). Etwa gleichzeitig lebten Amphibien wie *Metoposaurus* mit einem Schädel von zirka einem halben Meter Länge (unten).

lich wurde das vermutlich, weil sich die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Regionen durch Veränderungen der Monsunwinde und des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre abschwächten, so dass die Dinosaurier zwischen beiden Zonen leichter hin- und herwandern konnten.

Aber sie hatten noch einen langen Weg vor sich. Die besten Belege für die ersten Wüsten bewohnenden Dinosaurier stammen aus Regionen, die heute wiederum Wüsten sind, wie den farbenprächtigen Ödlandschaften im Südwesten der Vereinigten Staaten. Seit mehr als einem Jahrzehnt gräbt eine Gruppe junger Wissenschaftler systematisch im Hayden Quarry, einer fossilienreichen Fundstätte in New Mexico. Die Forscher entdeckten hier eine Fülle von Skeletten: riesige Amphibien, die eng mit dem portugiesischen *Metoposaurus* verwandt sind, primitive Krokodile sowie eine ganze Reihe seltsamer schwimmender oder von Baum zu Baum springender Reptilien. Auch Dinosaurier gab es im Hayden Quarry, allerdings nicht viele: Wenige Arten räuberischer Theropoden sind jeweils nur durch einige Fossilien repräsentiert; Pflanzenfresser fehlen ganz. Weder die urtümlichen Arten mit langem Hals, die in den feuchten Zonen so verbreitet waren, noch die Vogelbeckenvorfahren von *Triceratops* ließen sich aufspüren.

Zahlenmäßig unterlegen

Die Wissenschaftler führen die geringe Zahl von Dinosauriern abermals auf das Klima zurück: In den Wüsten herrschten instabile Umweltbedingungen mit stark schwankender Temperatur und heftigen Niederschlägen, verheerenden Waldbränden zu manchen Jahreszeiten sowie hoher Feuchtigkeit in anderen. Da auch Pflanzen nur schwer stabile Lebensgemeinschaften bilden konnten, fehlten den Herbivoren eine zuverlässige Nahrungsquelle. Somit hatten die Dinosaurier 20 Millionen Jahre nach ihrem Auftritt immer noch keine globale Revolution eingeleitet.

Egal welchen Teilabschnitt der Trias man betrachtet – vom Auftauchen der ersten Dinosaurier vor rund 230 Millionen Jahren bis zum Ende der Periode vor 201 Millionen Jahren – die Geschichte ist immer gleich: Nur wenige Dinosaurier waren in der Lage, manche Teile der Welt zu besiedeln, und wo sie auch lebten – in feuchten Wäldern oder sonnenversengten Wüsten –, sahen sie sich von allen möglichen größeren, weiter verbreiteten, vielgestaltigeren Tieren umgeben. Im argentinischen Ischigualasto-Reservat zum Beispiel machten die ersten Dinosaurier nur ungefähr 10 bis 20 Prozent des gesamten Ökosystems aus. Ähnlich sah die Situation in Brasilien und einige Jahrmillionen später im Hayden Quarry aus. In allen Fällen blieben die Dinosaurier den Vorfahren der Säugetiere, den großen Amphibien sowie anderen Reptilien zahlenmäßig unterlegen.

Vor allem aber wurden die Dinosaurier der Trias von ihren engen Verwandten überflügelt: den Pseudosuchia, dem Krokodilzweig der Archosaurier. So stand in Ischigualasto *Saurosuchus* mit seinen scharfen Zähnen und großen Kiefermuskeln an der Spitze der Nahrungskette. Hayden Quarry beherbergte etliche Pseudosuchia-Spezies: Neben halb im Wasser sitzenden Tieren mit langer Schnauze fanden sich gepanzerte Pflanzenfresser, und es gab sogar zahnlose Arten, die auf den Hinterbeinen liefen und verblüffend manchen Dinosauriern aus der Gruppe der Theropoden ähnelten, mit denen sie zusammenlebten.

Als Masterstudent erschien mir Ende der 2000er Jahre, als viele dieser Fossilien entdeckt wurden, eine solche Verteilung seltsam. Während ich die Welle neuer Fossilfunde verfolgte, las ich ebenfalls die klassischen Studien von herausragenden Paläontologen wie Robert Bakker (* 1945) und Alan Charig (1927–1997), der leidenschaftlich die Ansicht vertreten hatte, die Dinosaurier seien hinsichtlich Laufgeschwindigkeit, Ausdauer und Intelligenz so hervorragend angepasst gewesen, dass sie ihre krokodilartigen Vettern und andere Konkurrenten während der Trias schnell ver-

drängten. Aber dieser Gedanke schien nicht zu den Fossilfunden zu passen. Wie konnte ich dem nachgehen?

Nachdem ich mich in Statistik vertieft hatte, bemerkte ich, dass Paläontologen, die sich mit wirbellosen Tieren beschäftigten, schon vor zwei Jahrzehnten eine Methode zur Messung der anatomischen Vielfalt in einer Artengruppe entwickelt hatten, aber die Dinosaurierforscher hatten dieses Verfahren bislang nicht zur Kenntnis genommen. Es handelt sich um die morphologische Disparität. Wenn man die Formenvielfalt der Dinosaurier und Pseudosuchia während der Trias betrachtet, sollte sich zeigen, ob sie mit der Zeit mehr oder weniger vielgestaltig wurden, und mit welcher Geschwindigkeit das geschah. Das wiederum wäre ein Hinweis darauf, ob sie allmählich oder schlagartig erfolgreich wurden und ob dabei eine Gruppe die andere überholte.

Zusammen mit meinen damaligen Betreuern an der University of Bristol stellte ich einen großen Datenbestand über die Dinosaurier und Pseudosuchia der Trias zusammen, mit dem sich mehr als 400 anatomische Merkmale beurteilen ließen. Die statistische Analyse, 2008 in »Science« veröffentlicht, lieferte ein verblüffendes Ergebnis: Während der gesamten Trias erwiesen sich die Pseudosuchia signifikant als anatomisch vielgestaltiger als die Dinosaurier – die Evolution hatte also bei Ersteren mit einer größeren Anzahl an unterschiedlichen Ernährungsformen oder Verhaltensweisen experimentiert. Bei beiden Gruppen nahm die Diversität im Lauf der Trias zu, dabei behielten aber die Pseudosuchia die Führung. Im Gegensatz zu der allgemein herrschenden Vorstellung, Dinosaurier hätten als überlegene Kämpfer ihre Konkurrenten abgeschlachtet, blieben sie in Wirklichkeit gegenüber den Pseudosuchia während eines großen Teils ihrer gemeinsamen Existenz die Verlierer.

Die Dinosaurer nutzen ein erneutes Massenausterben als ihre Chance

Unsere statistische Analyse führte zu einer ketzerischen Schlussfolgerung: Die ersten Dinosaurier waren im Vergleich zu der Vielfalt anderer Tiere, die sich zusammen mit ihnen während der Trias entwickelten, nichts Besonderes. Wenn wir damals dabei gewesen wären, um das Leben in Pangäa zu beurteilen, wären uns die Dinosaurier wahrscheinlich als recht unbedeutend vorgekommen. Wir hätten wohl auf eine andere Tiergruppe gesetzt und vermutet, dass die ungeheuer vielfältigen Pseudosuchia zu gewaltiger Größe heranwachsen und schließlich die weltweite Vorherrschaft erringen würden. Aber natürlich wissen wir, dass es die Dinosaurier waren, die den größten Aufstieg erlebten und noch heute in Form von mehr als 10000 Vogelarten unter uns weilen. Dagegen haben nur rund zwei Dutzend Arten von Krokodilen bis heute überlebt.

Wie konnten die Dinosaurier ihren Vettern die Macht entreißen? Wieder einmal spielte ein glücklicher Zufall die Hauptrolle: Gegen Ende der Trias zogen starke geologische Kräfte den Kontinent Pangäa von Osten und Westen auseinander, so dass er zerbrach. Heute füllt der Atlantik die Lücke aus, damals aber lag dort ein Magmakanal. Mehr als eine halbe Million Jahre lang strömten riesige Lavawellen über weite Gebiete im Zentrum Pangäas – ähnlich wie bei den gewaltigen Vulkanausbrüchen, die 50 Millionen Jahre zuvor das Ende des Perm eingeleitet hatten. Und genau wie diese früheren Eruptionen lösten auch die am Ende der Trias ein Massenaussterben aus. Die Krokodillinie der Archosaurier wurde dezimiert, und nur wenige Arten – die Vorfahren der heutigen Krokodile und Alligatoren – konnten überdauern.

Die Dinosaurier blieben dagegen von diesem Feuersturm mehr oder weniger verschont. Alle ihre wichtigen Untergruppen – Theropoda, Sauropodomorpha und Ornithischia – erreichten die nächste Periode der Erdgeschichte, die Jurazeit. Während um sie herum die Welt unterging, gediehen die Dinosaurier, die irgendwie das sie umgebende Chaos für sich nutzen konnten. Ich wünschte, ich wüsste wie das ihnen gelang. Hatten die Dinosaurier etwas Besonderes, dass ihnen gegenüber den Pseudosuchia einen Vorteil verschaffte? Oder kamen sie einfach durch schieres Glück unversehrt davon, während so viele andere zu Grunde gingen? Das bleibt ein Rätsel für die nächste Paläontologengeneration.

Was auch der Grund war, warum die Dinosaurier die Katastrophe überlebten, die Folgen sind unübersehbar. Vom Joch ihrer Pseudosuchia-Konkurrenten befreit, begann im Jura ihre Blütezeit. Die Dinosaurier wurden vielgestaltiger und größer als je zuvor. Neue Arten entstanden und verbreiteten sich in den terrestrischen Ökosystemen auf der ganzen Welt. Unter den Neuankömmlingen waren einige, die sich erstmals mit Knochenplatten auf dem Rücken panzerten; wahrhaft riesige Sauropoden ließen die Erde erbeben; Fleisch fressende Vorfahren von *T. rex* wurden größer und größer; andere Theropoden schrumpften dagegen, bekamen längere Arme sowie ein Federkleid – die Vorfahren der Vögel. Jetzt herrschten die Dinosaurier. Sie hatten mehr als 30 Millionen Jahre dazu gebraucht, aber nun waren sie endlich am Ziel. ◂

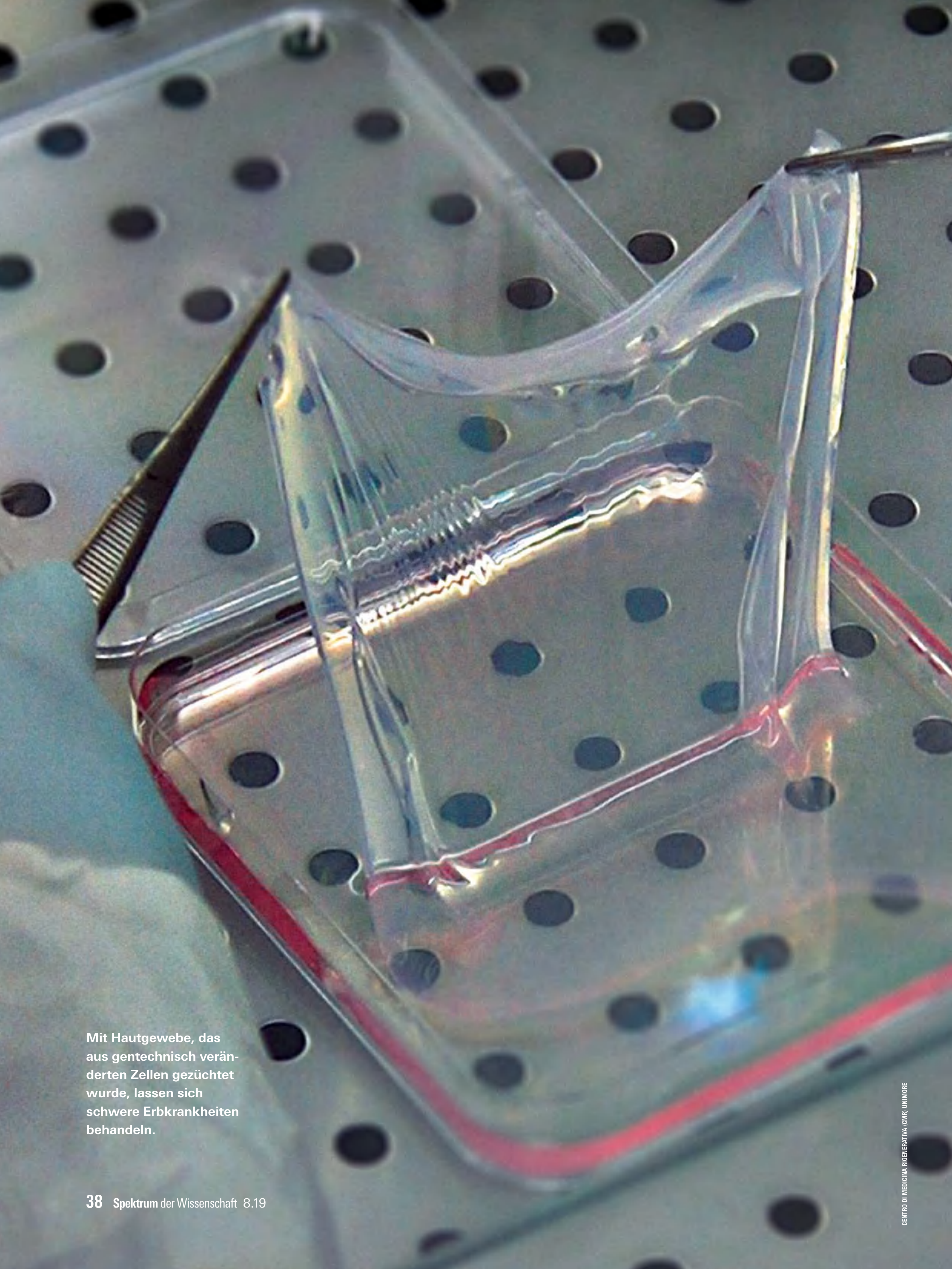
QUELLEN

Brusatte, S.L. et al.: Superiority, competition, and opportunism in the evolutionary radiation of dinosaurs. Science 321, 2008

Brusatte, S.L. et al.: The origin and early radiation of dinosaurs. Earth-Science Reviews 101, 2010

Brusatte, S.L. et al.: Footprints pull origin and diversification of dinosaur stem lineage deep into Early Triassic. Proceedings of the Royal Society B 278, 2011

Langer, M.C. et al.: Untangling the dinosaur family tree. Nature 551, 2017



Mit Hautgewebe, das aus gentechnisch veränderten Zellen gezüchtet wurde, lassen sich schwere Erbkrankheiten behandeln.

MEDIZIN
EINE NEUE HAUT

Wenn das größte Organ unseres Körpers schwer erkrankt, hat das oft fatale Folgen. Verblüffende Heilungschancen bietet nun die Gentherapie.



Kat Arney arbeitet als Wissenschaftsautorin und Rundfunkmoderatorin. Sie lebt in der Nähe von London.

spektrum.de/artikel/1654776

Fachartikel sind oft schwer verständlich, aber es kommt selten vor, dass die Lektüre regelrecht schmerzt. Doch wer das erste Bild in dem »Nature«-Paper »Regeneration of the entire human epidermis using transgenic stem cells« betrachtet, kann kaum anders, als zusammenzuzucken: Es zeigt den kleinen Jungen Hassan, der von Kopf bis Fuß mit offenen, blutenden Wunden übersät ist.

Der Sohn syrischer Flüchtlinge, die nach Deutschland kamen, leidet an einer angeborenen Hauterkrankung namens Epidermolysis bullosa junctionalis (EBJ). Dieser schweren Komplikation liegt ein Defekt in einem der Gene *LAMA3*, *LAMB3* und *LAMC2* zu Grunde. Sie enthalten die Baupläne für Untereinheiten des Proteins Laminin-332, das dafür sorgt, dass die Deck- und Bindegewebsschichten der Haut miteinander verbunden sind. Ist das Protein infolge fehlerhafter Erbanlagen defekt, löst sich die Ober- von der Lederhaut, und überall auf dem Körper sowie den inneren Schleimhäuten entstehen schmerzhafte Blasen und großflächige Wunden, die sich häufig infizieren.

Im Jahr 2015 war Hassan sieben Jahre alt und seine Haut fast vollständig zerstört; auf Grund schwerer bakterieller Infektionen schwebte er in Lebensgefahr. Ärzte an der Ruhr-Universität in Bochum konnten ihn nur palliativmedizinisch behandeln, um seine Qualen so gut es ging zu lindern. Doch Hassans Vater fragte sie, ob es möglicherweise experimentelle Therapien gebe, die sich noch im Versuchsstadium befänden. Daraufhin nahmen die Ärzte Kontakt zu dem Biomediziner Michele De Luca von der Universität Modena und Reggio Emilia (Italien) auf, der eine radikale neue Therapiemethode entwickelt.

Patienten mit ihren eigenen Zellen behandeln

De Lucas Forschungen stützen sich auf die Arbeiten des Zellbiologen Howard Green vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Dieser hatte als Erster entdeckt, dass sich Hautgewebeschichten im Labor züchten lassen und es auf diese Weise möglich ist, individuelle Hauttransplantate herzustellen, die das Immunsystem des Empfängers nicht abstößt. De Luca arbeitete in den 1980er Jahren an der Harvard Medical School in Boston, Massachusetts, mit Green zusammen und begann später damit, dessen Behandlungsansatz weiterzuentwickeln. Er möchte genetisch bedingte Hauterkrankungen heilen, indem er in Zellen des Patienten den krank machenden Defekt gentechnisch behebt, aus den Zellen anschließend Gewebe züchtet und dieses den Patienten einpflanzt. Besonders interessant dabei ist das Deckgewebe der Haut, die so genannte Epidermis oder Oberhaut.

»Wir arbeiten schon seit vielen Jahren mit Kulturen aus Epidermiszellen, haben hunderte Patienten behandelt und

SERIE
Gentherapie

Teil 1: Juli 2019
Gentherapie gegen Hörschäden
Dina Fine Maron
Bessere Verpackung für Genpakete
Neil Savage

Teil 2: August 2019
Eine neue Haut
Kat Arney
Anleitung zum Selbstschutz
Amanda Keener

Teil 3: September 2019
Reparatur in der Gebärmutter
Sarah Deweerdt

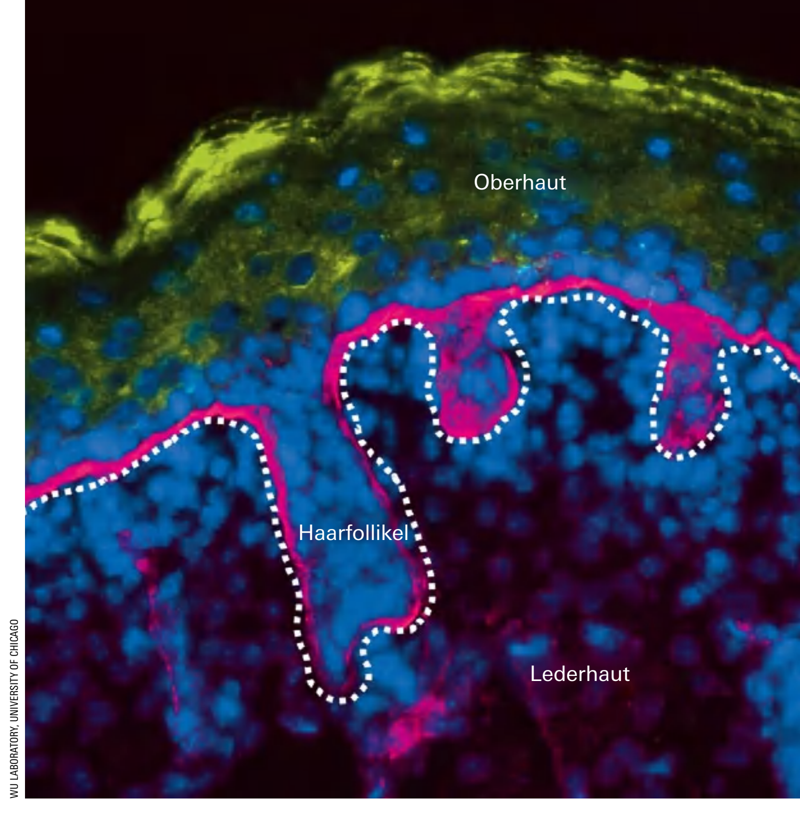
intensive Grundlagenforschung in der Stammzellbiologie betrieben«, schildert De Luca. »Dabei haben wir reichlich klinische Erfahrung gesammelt, somit lag es nahe für uns, mit gentechnisch modifizierten Zellen auch seltene Hauterkrankungen wie die EBJ zu therapieren.«

Hautzellen mit verändertem Erbgut für medizinische Zwecke zu züchten, schlug erstmals 1994 der Dermatologe Gerald Krueger von der University of Utah in Salt Lake City vor. Bereits 2006 führten De Luca und sein Team eine kleine Studie dazu durch. Sie behandelten einen 36-jährigen Mann, der wegen eines Defekts im Gen *LAMB3* an EBJ erkrankt war. Das Team transplantierte ihm neun kleine Hautstücke, die aus seinen eigenen Epidermiszellen gezüchtet worden waren. Zuvor hatten die Forscher mit Hilfe von Viren intakte *LAMB3*-Gene in die Zellen eingebracht. Die verpflanzten Hautstücke blieben mehr als ein Jahr lang intakt und gesund, womit der Nachweis erbracht war, dass der Therapieansatz die Erkrankung über längere Zeit hinweg zurückdrängen kann.

Trotz dieses frühen Erfolgs kam De Lucas klinische Forschung fast zehn Jahre lang zum Erliegen, ausgebremst von der EU-Gesetzgebung hinsichtlich Zell- und Gentherapien. »Laut den Vorschriften galten unsere Transplantate als Medizinprodukte und hatten denselben Regulierungsprozess wie diese zu durchlaufen«, berichtet der Biomediziner. »Wir mussten alle Arbeiten stoppen, eine regelkonforme Produktionsanlage aufbauen und die Therapie registrieren lassen. Erst 2015 konnten wir unsere Studien endlich fortsetzen.«

Fast die gesamte Oberhaut ersetzt

Für Hassan war das zum Glück gerade noch rechtzeitig. De Luca und seine Kollegen entnahmen aus der Leistengegend des Jungen ein winziges Hautstück, kultivierten die daraus gewonnenen epidermalen Stammzellen und schleusten mittels eines Virus eine intakte Version des Gens *LAMB3* in diese ein. Die nächste Herausforderung bestand darin, die so veränderten Zellen zu Hautstückchen von jeweils etwa zwölf Quadratzentimeter Fläche heranzuzüchten – und



Transplantiertes Hautgewebe einer Maus unter dem Mikroskop.

hinreichend viele davon zu erzeugen, damit der plastische Chirurg Tobias Hirsch von der Ruhr-Universität Bochum den Körper des Jungen mit ihnen bedecken konnte.

Nach zwei größeren Operationen, in denen die Ärzte Hassans Oberhaut an Rumpf und Extremitäten ersetzten, und einigen kleineren Eingriffen waren etwa 80 Prozent der Epidermis des Jungen ausgetauscht. Bis heute ist das eine Rekord-OP hinsichtlich der Menge des transplantierten, genetisch modifizierten Gewebes. Als die Ergebnisse dieser Arbeit 2017 in »Nature« publiziert wurden (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 9), waren Hassans blutige Wunden weitgehend einer glatten und gesunden Haut gewichen.

Die Fachpublikation schildert nicht nur den klinischen Verlauf des Falls, sondern erklärt auch, warum die Behandlung erfolgreich war. Haut besteht aus vielen verschiedenen Zelltypen, einige davon kurz-, andere langlebig. De Luca und sein Team haben gezeigt, dass eine erfolgreiche Transplantation mit anhaltender Wirkung nur gelingt, wenn es sich bei den gentechnisch veränderten Zellen um so genannte Holoklone handelt – einen relativ seltenen Zelltyp, der sich unbegrenzt erneuern kann. Indem sie die Bedingungen der Zellkultur sorgfältig regulierten, gelang es den Wissenschaftlern, solche Holoklone zu züchten und damit die Erfolgschancen der Transplantation zu erhöhen.

»Drei Jahre nach der Therapie haben sich auf Hassans verpflanzter Haut keine neuen Blasen gebildet, und wir hoffen, dass das lebenslang so bleibt«, sagt der Biomediziner. »Zwar konnten wir nicht überall auf seinem Körper die Epidermis austauschen, weshalb es immer noch erkrankte Regionen gibt, und Gewebe wie die Mundschleimhaut konnten wir ebenfalls nicht behandeln – doch selbst, wenn keine vollständige Heilung möglich war, sind doch vier Fünftel seiner Haut wieder intakt.«

AUF EINEN BLICK
ERFOLGSSTORY FÜR DIE GENTHERAPIE

1 2015 haben Mediziner einen Jungen, der an einer angeborenen Hautkrankheit mit schwersten Komplikationen litt, per Gentherapie behandelt – bis heute erfolgreich.

2 Sie entnahmen dazu Zellen seiner Oberhaut, korrigierten einen genetischen Defekt darin, züchteten Hautgewebe aus den Zellen und verpflanzten es auf seinen Körper.

3 Das Verfahren könnte gegen viele weitere Krankheiten und Gesundheitsprobleme helfen, womöglich etwa gegen Diabetes oder Drogensucht.

Andere Wissenschaftler arbeiten ebenfalls mit genetisch verändertem Hautgewebe. Der Krebsforscher Xiaoyang Wu von der University of Chicago in Illinois beispielsweise betreibt entsprechende Studien, freilich mit anderen Zielen als De Luca. 2017 konnten seine Mitarbeiter und er zeigen, dass gentechnisch modifizierte Hauttransplantate als lebende Medikamentendepots dienen können, vergleichbar etwa den bekannten Nikotin- oder Hormonpflastern.

Mit der Genschere CRISPR-Cas9 fügten die Wissenschaftler in das Erbgut epidermaler Stammzellen eine Variante jenes Gens ein, das für das Hormon GLP1 codiert. GLP1 reguliert den Blutzuckerspiegel und unterdrückt den Appetit. Die Genversion, die Wu und sein Team einschleusten, ließ sich durch eine Gabe des Antibiotikums Doxycyclin aktivieren. Aus den so veränderten Stammzellen züchteten die Forscher kleine Hautstücke und verpflanzten sie auf den Rücken von Labormäusen. Verabreichten sie den Tieren später das Antibiotikum, schütteten die transplantierten Hautstücke GLP1 ins Blut aus – was bei Nagern, die fettreich ernährt wurden, sowohl die Gewichtszunahme verlangsamte als auch einen Diabetes verhinderte.

Turbostoffwechsel entfernt Droge sehr schnell

Mit der gleichen Technik hat Wus Arbeitsgruppe zudem Hautstücke hergestellt, die eine verbesserte Version des Kokain abbauenden Enzyms BChE erzeugen. Dabei bringen sie Genmaterial in die Zellen ein, das für ein Protein codiert, welches die Droge mehr als 4000-mal schneller verstoffwechselt als die natürliche Form des Enzyms. Es sollte Kokain daher sehr schnell aus dem Körper entfernen und das »High«-Gefühl rasch stoppen.

Verpflanzt auf Mäuse, verhinderten entsprechende Gewebepräparate, dass die Tiere kokainabhängig wurden, und unterbanden die Symptome einer Überdosis. Das scheint ein viel versprechender Ansatz für die Behandlung von Drogenabhängigen zu sein. Wus Team forscht zudem über künstliche Transplantate, die als Langzeitbiosensoren dienen. Sie könnten beispielsweise modifizierte Zellen enthalten, die als Reaktion auf den Blutzuckerspiegel ihre Farbe oder Fluoreszenzeigenschaften ändern.

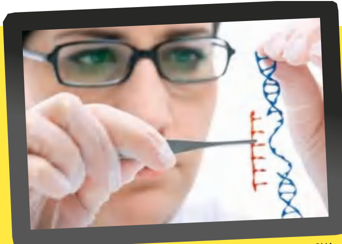
»Viele Wissenschaftler auf dem Feld der Gentherapie konzentrieren sich auf innere Organe wie die Leber, aber die Haut ist ein viel besserer Angriffspunkt – wir können ihre Zellen unbegrenzt kultivieren und sie außerhalb des Körpers verändern«, zeigt sich Wu überzeugt. »Wir können auch sehr sorgfältig auswählen, aus welchen Zellen das Transplantat bestehen soll, und so unerwünschte Nebeneffekte oder fehlerhaft eingebrachte Mutationen vermeiden.«

Studien an Menschen werden allerdings noch ein paar Jahre auf sich warten lassen. »Aktuell sind wir dabei, die grundsätzliche Machbarkeit nachzuweisen«, sagt Wu. »Sobald die Technik stärker etabliert ist und wir das Verfahren sicher im Griff haben, können wir über klinische Tests nachdenken, aber nicht vorher.«

De Luca führt derweil zwei klinische Studien mit Patienten durch, die an verschiedenen Formen der EBJ leiden. Längerfristig hat er vor, seinen Behandlungsansatz auf weitere Hauterkrankungen aus dem Spektrum der Epidermolysis bullosa hereditaria auszudehnen. Deren diverse Untertypen können von Mutationen in einem von mindestens 18 Genen verursacht werden und betreffen in den USA etwa eines von 20000 Neugeborenen. Indem er sich auf junge Patienten fokussiert, die am meisten von einer frühen Behandlung profitieren, hofft De Luca, den größten Nutzen zu stiften.

»Wenn wir diese Kinder so zeitig wie möglich behandeln, verhindern wir, dass Hautschäden überhaupt erst entstehen, statt sie später heilen zu müssen – und wir brauchen natürlich nicht so viel Hautgewebe für die Therapie zu züchten, da weniger Körperfläche abzudecken ist«, betont der Biomediziner. »Hätte man mich vor 30 Jahren gefragt, ob es möglich sei, die gesamte Oberhaut mit gezüchteter, genetisch veränderter Epidermis zu ersetzen, hätte ich mit Nein geantwortet. Jetzt aber haben wir es getan. Mein Wunsch ist es, dass diese Gentherapie zu einer echten Behandlungsoption für betroffene Kinder avanciert – nicht nur in Form einer klinischen Studie oder eines Machbarkeitsnachweises, sondern als etablierte Therapiemethode für alle, die sie benötigen.«

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/gentherapie


GERNOT KRAUTBERGER / FOTOLIA

Mehr als drei Jahre nach der Rekordtransplantation seiner Oberhaut ist Hassan der lebende Beweis dafür, dass dieser Wunsch nicht unrealistisch ist. Der Junge besucht das Team an der Universität Modena und Reggio Emilia regelmäßig für Kontrolluntersuchungen. »Damals im Krankenhaus wog er nur 17 Kilo und lag im Sterben; heute sehen wir ihn heranwachsen«, sagt De Luca stolz. »Jedes Mal, wenn er vorbeikommt, gibt es ein großes Fest, und alle möchten ihn umarmen.« ◂

QUELLEN

Hirsch, T. et al: Regeneration of the entire human epidermis using transgenic stem cells. Nature 551, 2017

Li, Y. et al.: Genome-edited skin epidermal stem cells protect mice from cocaine-seeking behaviour and cocaine overdose. Nature Biomedicine England 3, 2019

Mavilio, F. et al.: Correction of junctional epidermolysis bullosa by transplantation of genetically modified epidermal stem cells. Nature Medicine 12, 2006

Yue, J. et al.: Engineered epidermal progenitor cells can correct diet-induced obesity and diabetes. Cell Stem Cell 21, 2017

Nature 564, S. 14–15, 2018

IMMUNOLOGIE

ANLEITUNG ZUM SELBSTSCHUTZ

Manche Gentherapien könnten menschliche Zellen in Produktionsstätten für maßgeschneiderte Proteine verwandeln. Mit dieser Technik werden die teuren Nachteile von Antikörpertherapien vermieden.

Wenn man die Bauanleitung für Antikörper gegen Krankheitserreger ins Erbgut von Körperzellen einschleust, können diese auch ohne vorherige Immunreaktion die Abwehrmoleküle herstellen.

TEKA77 / GETTY IMAGES / ISTOCK



Amanda Keener ist Reporterin bei »National Geographic«. Zuvor arbeitete sie als Redakteurin für »Scientific American«.

spektrum.de/artikel/1654758

Weltweit treten Infektionskrankheiten zunehmend häufig auf: Zwischen 1980 und 2010 hat sich die Zahl der dokumentierten Ausbrüche alle fünf Jahre mehr als verdreifacht. Nach unerwartet heftigen Epidemien des Ebola- und Zikafiebers suchen Wissenschaftler nun verstärkt nach schnelleren und billigeren Methoden, um gegen Krankheitserreger vorzugehen, über die noch recht wenig bekannt ist. Dazu gehören künstlich hergestellte Antikörper – Proteine, die sich im Körper einer infizierten Person direkt an Viren oder Bakterien binden und das Immunsystem dazu bringen, diese Erreger auszuschalten. Sie können zudem Personen, die bestimmten Krankheitserregern unvermeidlich ausgesetzt sind (etwa medizinisches Personal), vor einer Ansteckung schützen.

Antikörper künstlich zu produzieren, ist jedoch teuer. Außerdem müssen die Moleküle anschließend kühl gelagert sowie den Patienten oft mehrmals verabreicht werden, um hinreichend stark zu wirken. Hinzu kommt der Zeitaufwand: Die Zellen heranzuzüchten, die das gewünschte Protein produzieren, die Moleküle dann zu reinigen und vor dem Einsatz zu testen, all das nimmt oft ein bis zwei Jahre in Anspruch. »Eine beginnende Epidemie lässt sich nur während eines kurzen Zeitfensters stoppen – daher wirft es Probleme auf, dass die Herstellung von Antikörpern so lange dauert«, sagt Neal Padte, Geschäftsführer des Biotechnologieunternehmens RenBio in New York City.

Ein Konzept ähnlich der DNA-Impfung

Padte gehört einer wachsenden Gruppe von Forschern an, die solche aufwändigen und teuren Produktionsschritte umgehen möchten, indem sie dem Organismus die genetische Information bereitstellen, um die Antikörper selbst zu erzeugen. Das lässt sich erreichen, indem man DNA-Sequenzen, die für den jeweiligen Antikörper codieren, in Körperzellen einbringt – eine Technik namens Antikörper-Gentransfer. Sie ähnelt vom Konzept her der DNA-Impfung, die den genetischen Bauplan für Impfstoffproteine in die Zellen einschleust. Die beiden Methoden unterscheiden sich allerdings in einem wichtigen Punkt: DNA-Impfstoffe veranlassen den Organismus dazu, körperfremde Proteine herzustellen, die dann ihrerseits eine Immunreaktion einschließlich Antikörperproduktion auslösen. Der Antikörper-Gentransfer hingegen bewirkt auf direktem Weg, dass die Körperzellen solche Abwehrmoleküle synthetisieren – ohne vorherige Immunreaktion.

Gestützt auf die Erfahrungen mit DNA-Impfstoffen und Gentherapien bringen Wissenschaftler derzeit klinische Studien auf den Weg, in denen sie medizinische Anwendungen des Antikörper-Gentransfers testen möchten. Dabei sollen Infektionskrankheiten nur der erste Schritt sein. Denn auch für die Behandlung nichtinfektiöser Erkrankungen wie Krebs erscheint das Konzept viel versprechend. »Wo immer sich die Gabe von Antikörpern als wirksam erwiesen hat, sollte auch ein Antikörper-Gentransfer etwas ausrichten«, zeigt sich Padte überzeugt.

Selbstverständlich müssen die Mediziner für diese Methode nachweisen, dass sie sicher, verträglich und effizient ist – genau wie bei anderen Gentherapien. Darüber hinaus gibt es jedoch noch weitere Hürden. So erfordert das Verfahren, dass Körperzellen, die normalerweise keine Antikörper bilden, diese nach dem Eingriff in genügend großen Mengen produzieren. »Wir wissen, dass das im Tierversuch bei Mäusen klappt – und zwar sehr verlässlich«, sagt Kevin Hollevoet, Immunologe an der Katholischen Universität Löwen in Belgien. Die große Frage sei nun, ob der Antikörper-Gentransfer auch beim Menschen funktioniere.

David Weiner, Direktor am Vaccine & Immunotherapy Center des Wistar Institute in Philadelphia (Pennsylvania), entwickelt und optimiert DNA-Impfungen seit fast 30 Jahren. Um das Jahr 2010 herum erkannte er, dass seine Arbeiten aber ebenso ein ganz anderes Gebiet betreffen. Seine Tochter, damals ein Teenager, erkrankte an dem chronisch-entzündlichen Darmleiden Morbus Crohn, und die einzige Therapie, die ihr half, war die Gabe eines monoklonalen Antikörpers mehrmals pro Monat. Weiner beschäftigte sich nun intensiv mit Antikörpertherapien, bei denen die Ärzte beispielsweise entzündungshemmende Substanzen wie Adalimumab oder Immuncheckpoint-Inhibitoren wie Pembrolizumab (siehe **Spektrum** Oktober 2016, S. 32) verabreichen. »Antikörper gehören derzeit zu den wichtigsten Themen in der Biotechnologie«, betont der Wissenschaftler.

Medikamente auf ihrer Basis sind allerdings extrem teuer. Jährliche Behandlungskosten von bis zu 100 000 Dollar machen sie für den größten Teil der Weltbevölkerung unerschwinglich. Weiner glaubt, dass der Antikörper-Gentransfer wesentlich mehr Menschen den Zugang dazu ermöglichen könnte. Denn DNA herzustellen, kostet erheblich weniger, als Antikörper zu produzieren. Bei DNA-

AUF EINEN BLICK

DER MENSCH ALS ANTIKÖRPERFABRIK

1. Viele Krankheiten lassen sich wirksam behandeln, indem man den Patienten Antikörper verabreicht. Deren Herstellung ist allerdings teuer.

2. Statt die Antikörper als fertige Moleküle anzuwenden, ist es auch möglich, ihre genetische Bauanleitung in Körperzellen einschleusen. Der Organismus stellt sie dann selbst her.

3. Dieser »Antikörper-Gentransfer« könnte billiger und flexibler sein als herkömmliche Antikörperbehandlungen. Erste klinische Studien dazu sind auf dem Weg.

basierten Behandlungen sind zudem weniger Gaben des Arzneistoffs erforderlich, weil die Nukleinsäure im Optimalfall wochen- bis monatelang im Zellkern überdauert und die Zelle die ganze Zeit über Antikörper produziert.

Seit dem Jahr 2013 entwickelt das von Weiner mitgegründete Unternehmen Inovio Pharmaceuticals in Plymouth Meeting (Pennsylvania) gemeinsam mit seinem Team am Wistar Institute verschiedene therapeutische Gene, die für Antikörper codieren. Den Anfang dabei machten Proteine, die sich gegen die viralen Erreger des Chikungunya- und des Denguefiebers richteten. Mittlerweile haben die Forscher ihr Spektrum erweitert und arbeiten nun auch an Antikörper-Gentransfer-Methoden gegen bakterielle Erreger von Lungenentzündungen, die antibiotikaresistent sind, sowie gegen zwei Proteine, die in Prostatatumoren vermehrt vorkommen. Aktuell versuchen sie das Verfahren so zu modifizieren, dass sich damit Ebolavirus-Infektionen bekämpfen lassen – wobei sie sich auf Antikörper stützen, die aus dem Blut von Überlebenden stammen.



ISTOCK / DRA_SCHWARTZ

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/crispr**

Inovio Pharmaceuticals ist nicht das einzige Unternehmen, das solche Therapien entwickelt. Mehreren Forschergruppen ist es per Antikörper-Gentransfer gelungen, Mäuse vor Infektionen zu schützen und das Immunsystem der Tiere dazu anzuregen, Tumoren zu attackieren. Ein internationales Team, zu dem Padte gehörte, hat in Körperzellen von Mäusen Gene eingeschleust, die für Antikörper gegen Ebolaviren beziehungsweise gegen Grippeviren codierten. Die so behandelten Nager waren immun gegen Ebola und Grippe.

Schutz vor Aids – mit Antikörpern, die mehrere HIV-Stämme neutralisieren

Der neue Therapieansatz ist auch im Hinblick auf HIV-Infektionen von großem Interesse. Eine Untergruppe der Infizierten (etwa jeder dritte) produziert Antikörper, die mehrere HIV-Stämme neutralisieren. Das könnte auf genetische Unterschiede zwischen den Patienten zurückzuführen sein, hängt aber möglicherweise ebenso von dem Erregerstamm ab, der den Organismus jeweils befällt. »Mit Hilfe des Antikörper-Gentransfers können wir die genetischen Bauanleitungen nachweislich wirksamer Antikörper sehr vielen Patienten zur Verfügung stellen – auch jenen, deren Organismus diese Moleküle nicht selbst herstellt«, sagt Alejandro Balazs, der am Ragon Institute (Cambridge, Massachusetts) über HIV-Immunität forscht. »Mit einem solchen Ansatz würden wir die individuelle Immunreaktion gegen das Virus verstärken und weniger vom Zufall abhängig machen.«

Am US National Institute of Allergy and Infectious Diseases in Bethesda (Maryland) laufen bereits entsprechende Tests. Forscher verabreichen hier ein Gen, das für einen HIV-Antikörper codiert, den Balazs und seine Kollegen schon seit mehr als einem Jahrzehnt untersuchen. Die Studie geht der Frage nach, wie sicher dieses Therapieverfahren bei HIV-infizierten Personen ist und ob deren Organismus die genetische Information tatsächlich nutzt, um die gewünschten Antikörper zu synthetisieren. Eine separate Studie der International AIDS Vaccine Initiative in New York City prüft an gesunden männlichen Teilnehmern die Sicherheit eines weiteren Gentransfers, bei dem der Bauplan für einen HIV-neutralisierenden Antikörper übertragen wird. Die Ergebnisse beider Studien sollten zeigen, wie gut dieser Behandlungsansatz beim Menschen funktioniert.

Es gibt viele Möglichkeiten, um Erbmaterial in Zellen einzuschleusen. Forscher haben bislang nur wenige davon beim Menschen angewendet. In den Studien, die den Transfer von HIV-Antikörper-Genen testen, dient ein Adeno-assoziiertes Virus (AAV) als Genfähre. In das Muskelgewebe der Patienten gespritzt, soll es das gewünschte Erbmaterial in den Körperzellen abladen. AAV sind ein beliebtes Werkzeug der Gentherapie (siehe **Spektrum** Juli 2019, S. 20). Zu den Wissenschaftlern, die damit arbeiten, gehört Ronald Crystal, der sich an der Forschungseinrichtung Weill Cornell Medicine in New York City mit Gentherapien befasst. Sein Team und er nutzen AAV, um in das Gehirn demenzkranker Mäuse den Bauplan für einen Antikörper einzubringen, der sich gegen das Tau-Protein richtet. Dieses spielt bei der Alzheimerkrankheit eine wichtige Rolle.

Doch virale Fähren wie AAV für den Antikörper-Gentransfer einzusetzen, hat auch Nachteile. Die infektiösen Partikel lösen nämlich eine Immunreaktion aus, die den Erfolg der Therapie vereiteln kann. Und weil Viren in Zellkulturen vermehrt werden müssen, ist ihre Produktion oft zeitaufwändig und teuer. Transfermethoden, die ohne Viren auskommen, könnten diese Probleme umgehen. Ein solches Verfahren ist die Elektroporation, auch Elektropermeation genannt, bei der mit Hilfe elektrischer Felder eine große Potenzialdifferenz über der Zellmembran erzeugt wird, die einen vorübergehenden Zusammenbruch der Membranstruktur bewirkt. Durch die kurzzeitig entstehenden Löcher kann das Erbmaterial ins Zellinnere gelangen.

Das im britischen Oxford ansässige Unternehmen Scancell entwickelt Krebsimmuntherapien und hat die Elektroporation angewendet, um ein Gen in menschliche T-Lymphozyten einzuschleusen, das die Bauanleitung für einen künstlich designten Antikörper enthält. Dieser bringt die Lymphozyten dazu, Melanome (bösartige Tumoren der Pigmentzellen, als schwarzer Hautkrebs bezeichnet) anzugreifen. Im Jahr 2017 berichtete das Unternehmen, das Verfahren habe sich in Tests als sicher erwiesen und entfache eine Immunreaktion gegen den Krebs.

Andere Arbeitsgruppen schleusen nicht DNA, sondern Boten-RNA in die Zielzellen ein. Dabei handelt es sich um die Abschrift der genetischen Information, die in der DNA gespeichert ist. Boten-RNA (»mRNA«), übermittelt diese Information an Proteinfabriken außerhalb des Zellkerns, die dann entsprechende Eiweiße herstellen. Aus bisher unbe-

kannten Gründen nehmen Muskelzellen unter bestimmten Bedingungen mRNA-Moleküle auf, ohne dass hierfür eine Elektroporation erforderlich ist. Das macht das Verfahren als Transfermethode interessant.

2017 brachten Forscher um Drew Weissman von der University of Pennsylvania mRNA in Labormäuse ein, die für einen HIV-neutralisierenden Antikörper codiert. Dies schützte die Tiere vor einer HIV-Infektion. Das biopharmazeutische Unternehmen CureVac in Tübingen wiederum hat über erfolgreiche Versuche mit Boten-RNAs berichtet, die Baupläne für Antikörper gegen Grippe- und Tollwutviren enthielten: Mäuse, die damit behandelt wurden, produzierten die Moleküle und entwickelten einen Schutz vor Infektionen. Eine weitere mRNA mit der Bauanleitung für den monoklonalen Antikörper Rituximab, den Ärzte gegen Krebserkrankungen des Lymphsystems einsetzen, bewahrte Mäuse davor, an einem solchen Tumorleiden zu sterben. Und Wissenschaftler der Firma BioNTech in Mainz experimentieren mit Boten-RNA für T-Lymphozyten aktivierende Antikörper zur Immuntherapie von Krebserkrankungen.

Ausschalter für die Gentherapie

Während manche Mediziner nun in klinischen Studien testen, ob ein bestimmter Antikörper-Gentransfer gegen Infektionskrankheiten oder Krebsleiden hilft, überlegen andere, ob die Technik sich auch gegen chronische Erkrankungen wie rheumatoide Arthritis einsetzen lässt. Das ist freilich eine größere Herausforderung, da bei Patienten mit entsprechenden Leiden oft verschiedene monoklonale Antikörper getestet werden müssen, um einen hinreichend wirksamen zu finden. Ein Gentransfer, durch den der Organismus monate- oder jahrelang die gleiche Molekülsorte herstellt, wie dies beim Einsatz von AAV der Fall ist, würde einen solchen Wechsel erschweren. »Es besteht dabei die Gefahr, dass sich die Antikörperproduktion nicht abschalten lässt«, sagt Crystal.

Alejandro Balazs und andere Forscher entwickeln daher »Ausschalter« etwa in Form von entgegengerichteten Gentherapien oder speziellen Arzneistoffen. Vorerst bleibt unklar, ob die Therapieansätze, die bei Mäusen funktioniert haben, sich auf den Menschen übertragen lassen. »Die Genfähren, die der Arzt in das Muskelgewebe injiziert, wirken lediglich innerhalb eines begrenzten Volumens: Nur dort bringen sie ihre Fracht in Körperzellen ein, die dann den gesamten Organismus mit Antikörpern versorgen müssen«, gibt Kevin Hollevoet zu bedenken. Er führt Untersuchungen an Schafen durch, um bei diesen größeren Tieren besser vergleichbare Werte dafür zu bekommen, welche Mengen an Antikörperproteinen der menschliche Körper produzieren kann.

Von jenen Antikörpern, die bisher ausschließlich bei Tieren getestet wurden, ist nicht bekannt, wie hoch ihre Konzentration im menschlichen Blut sein muss, um eine Erkrankung erfolgreich zu behandeln. »Deshalb sind diese ersten klinischen Studien so wichtig«, betont Balazs. »Wir lernen dabei, eine wirksame Antikörperproduktion in Gang zu bringen.« Anschließend könnten sich die Forscher mit den nächsten Schritten befassen, etwa mit der Entwicklung passender Ausschalter. ◂

QUELLEN

Andrews, C.D. et al.: In vivo production of monoclonal antibodies by gene transfer via electroporation protects against lethal Influenza and Ebola infections. Molecular Therapy – Methods & Clinical Developments 7, 2017

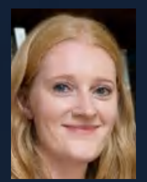
Liu, W. et al.: Vectored intracerebral immunization with the Anti-Tau monoclonal antibody PHF1 markedly reduces Tau pathology in mutant Tau transgenic mice. The Journal of Neuroscience 36, 2016

Pardi, N. et al.: Administration of nucleoside-modified mRNA encoding broadly neutralizing antibody protects humanized mice from HIV-1 challenge. Nature Communications 8, 2017

Nature 564, S. 16–17, 2018

SUPERVULKAN INFERNO AUS DER TIEFE

Unter Chile könnte sich etwas Verheerendes zusammenbrauen: ein Supervulkan, der mit seinem kühlen Innenleben alle bisherigen Erkenntnisse über die Triebfedern gewaltiger Eruptionen auf den Kopf stellt.

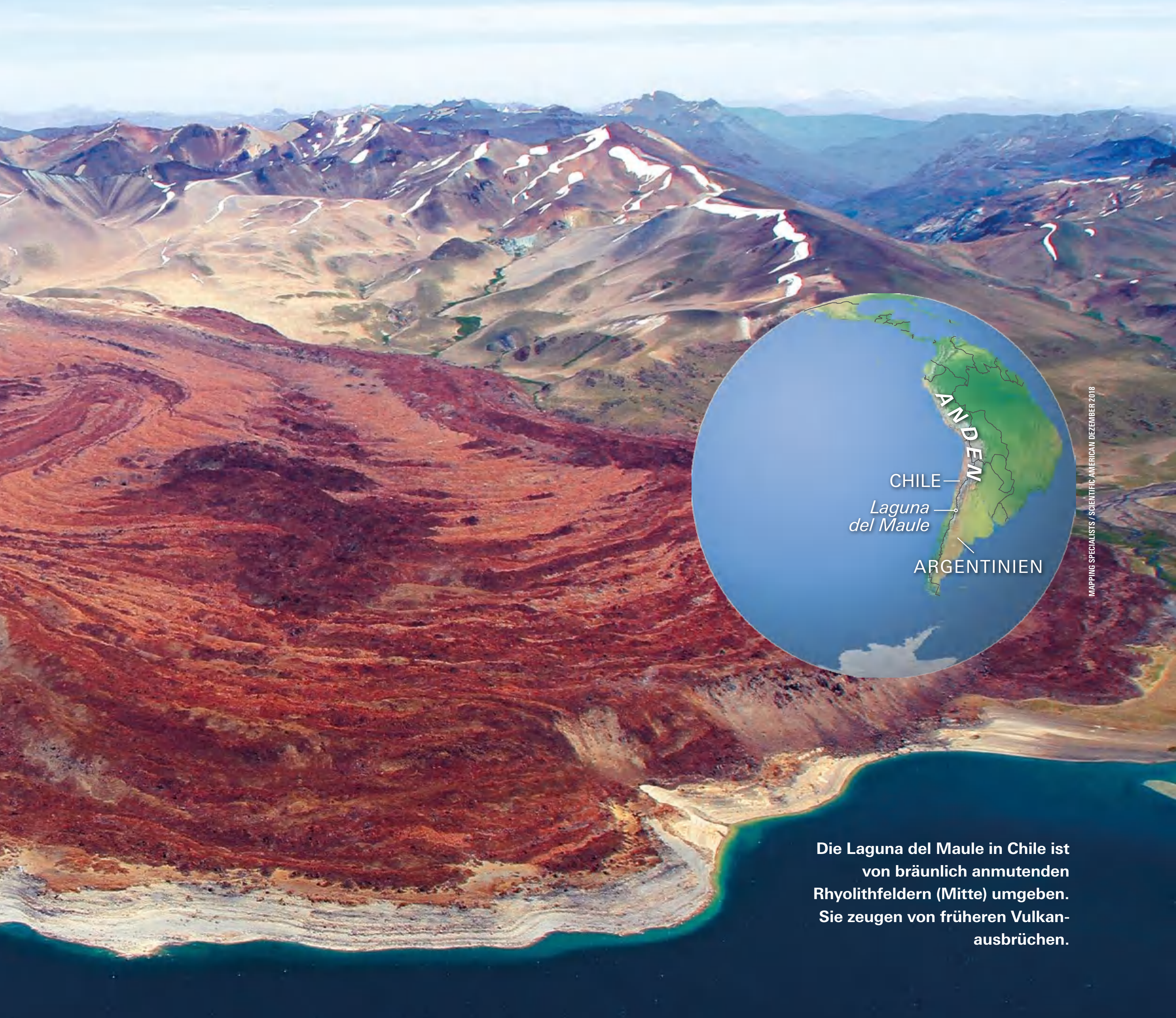


Shannon Hall hat sich als Wissenschaftsjournalistin auf die Gebiete Astronomie, Geologie und Umwelt spezialisiert. Sie lebt in den Rocky Mountains und wurde 2018 mit dem David Perlman Award für ihre Arbeit ausgezeichnet.

spektrum.de/artikel/1654760

Eine Ehrfurcht gebietende Landschaft offenbart die bewegte Geschichte der Vulkanregion um die Laguna del Maule in Chile. Etwa 50 Lavaströme, von denen sich einzelne über zig Quadratkilometer hinweg in der nackten Landschaft erstrecken, und 70 gigantische Felder mit Ascheablagerungen umringen dort einen 54 Quadratkilometer großen, eisblauen See. Nur vom Hubschrauber aus lassen sich die gewaltigen Ausmaße des Vulkanfelds wirklich erfassen, sagt der amerikanische Geologe Brad Singer, der seit 20 Jahren in diesem Gebiet forscht. Dann wird deutlich, dass sich an der Laguna del Maule die weltgröß-

ANGIE DIEFENBACH, USGS



MAPPING SPECIALISTS / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2018

Die Laguna del Maule in Chile ist von bräunlich anmutenden Rhyolithfeldern (Mitte) umgeben. Sie zeugen von früheren Vulkanausbrüchen.

ten Vorkommen von jungem Rhyolith befinden, einem Gestein, das in seiner flüssigen, magmatischen Form besonders explosiv und gefährlich ist.

Geologen halten die Ablagerungen für das Werk von 25 bis 30 verschiedenen Vulkanen, die in den vergangenen 20000 Jahren ausgebrochen sind. Diese Vorgeschichte erinnert auf unheilvolle Weise an die Long Valley Caldera in Kalifornien: Dort riss, zusätzlich zu einer ganz gewöhnlichen Explosionsserie, ein einzelner, gigantischer Vulkan vor etwa 765000 Jahren ein 500 Quadratkilometer großes Loch in die Landschaft. Darüber hinaus beobachten Wissenschaftler seit etwa zehn Jahren, dass sich der Boden unter der Laguna del Maule verdächtig aufwölbt. Der Schluss der Experten: In der Region könnte der nächste Supervulkan der Erde heranwachsen.

Supervulkanen wohnen mit die zerstörerischsten Kräfte auf unserem Planeten inne. Bei einer einzigen Eruption schleudern sie mindestens 1000 Kubikkilometer Lava und Asche in die Luft. Das ist 2500-mal so viel Gesteinsmaterial, wie der Mount St. Helens im US-Bundesstaat Washington bei seinem verheerenden Ausbruch 1980 ausspuckte. Karten der unterirdischen Magmakammer der Laguna del Maule zeigen, dass deren Größe bereits jetzt ausreicht, um eine solche Menge an Material freizusetzen – falls der Vulkan alles auf einmal in die Luft schleudert. Und selbst wenn sich das System in einer Serie kleinerer Ausbrüche abreagieren sollte, sieht es verdächtig nach den Riesen aus, die vor unserer Zeit aktiv waren.

Anders als die anderen bekannten Supervulkane entwickelt sich dieser neue Kandidat direkt vor unseren Augen. Alles, was Geologen über Megavulkane wissen, haben sie sich bis heute aus alten Gesteinen und Ascheablagerungen sowie anderen Folgeerscheinungen erschlossen – forensische Arbeit, die es ihnen ermöglicht, verschiedene Aspekte der Explosionen zu rekonstruieren. Doch die Laguna del Maule erwacht genau jetzt und ermöglicht es damit erstmals, »live« zu beobachten, was bei solchen Katastrophen vor sich geht.

ANGIE DIEFENBACH, USGS

Dieser neue Blick aus nächster Nähe, kombiniert mit Befunden älterer Supervulkane, hat die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schon zu einem überraschenden Schluss geführt: So beherbergen die gewaltigen unterirdischen Magmakammern, aus denen sich die Feuerriesen speisen, nicht etwa eine glühende Gesteinsschmelze, wie früher angenommen. Vielmehr ist die Masse dort vergleichsweise weniger heiß, oft sogar fest. Diese Erkenntnis stellt Vulkanologen vor ein Rätsel: Denn damit eine Eruption stattfinden kann, muss festes Magma schmelzen und rasch aufsteigen, binnen Jahrzehnten. Daher versuchen sie herauszufinden, wie dieser rapide Temperaturanstieg vonstattengeht, um so die heftigsten bislang erfolgten Eruptionen auf der Erde zu erklären.

Welche Kräfte solche Ereignisse freigesetzt haben, ist schwer vorstellbar. Ein gigantischer Vulkan brach beispielsweise vor 631000 Jahren im heutigen Yellowstone-Nationalpark in den Vereinigten Staaten aus. Er schleuderte glühende Aschewolken, giftige Gase und Ströme flüssigen Gesteins in die Luft, die sich über die Landschaft wälzten und alles unter sich begruben. Die Eruptionen füllten ganze Täler mit heißem, schwerem Material, das Gesteinsschichten bildete, die heute noch bis zu 200 Meter dick sind. Anschließend verdunkelte Asche den Himmel. Sie regnete auf einen breiten Streifen Nordamerikas herab und hinterließ Ablagerungen innerhalb eines Dreiecks, das von der heutigen US-Grenze zu Kanada bis hinunter nach Kalifornien und hinüber zum Golf von Mexiko reicht. Andere Supervulkane stießen bisweilen sogar so viel Asche aus, dass nach Meinung der Wissenschaftler kaum noch Sonnenlicht zur Erde durchdringen konnte und der Planet in einen vulkanischen Winter versank.

Und heute? 2008 bemerkte der Geophysiker Matthew Pritchard von der Cornell University in Ithaca im Bundesstaat New York beim Durchsehen von Satellitendaten ein ungewöhnliches Signal, das von den chilenischen Anden ausging. Die Daten auf seinem Computerbildschirm zeigten ein Ringmuster, das an ein psychedelisch gemustertes Bullauge erinnert. Solche »Aureolen« treten typischerweise auf, wenn sich die Bodenhöhe ändert. Allerdings beobachtet man sie in der Regel an der Spitze eines einzelnen, bekannten Vulkans. Hier jedoch erstreckte sich das Muster über eine 400 Quadratkilometer große Region mit Bergen und Ebenen. Etwas Seltsames ging vor sich. Pritchard begutachtete ältere Bilder und stellte fest, dass sich der Boden seit einem Zeitpunkt zwischen 2004 und 2007 um 20 Zentimeter pro Jahr anhebt. Das ist weltweit die größte Hebungsrate überhaupt – etwa zehnmal so groß wie diejenige im Yellowstone-Nationalpark, wo sich der Boden in den vergangenen Jahren mehrmals begonnen hat aufzuwölben, aber immer wieder zum Stillstand gekommen ist.

Die Bodendeformation an der Laguna del Maule hat angesichts der dortigen Eruptionsgeschichte in den letzten Jahren eine Reihe von Expeditionen angelockt. Die Wissenschaftler wollten feststellen, ob in dem Gebiet tatsächlich ein Ausbruch kurz bevorsteht und wie heftig dieser wohl sein könnte. 2013 startete Brad Singer ein fünfjähriges Forschungsprojekt, um den früheren und den gegenwärtigen Zustand des Systems zu untersuchen. In Zusammenarbeit mit der chilenischen Geologie- und Bergbaubehörde brachten der Forscher und seine Kollegen etwa 50 Messstationen am Boden an, vermaßen vom Hubschrauber aus den Seegrund mit Laserscannern und nahmen Proben alter Gesteine, die sie später im Labor analysierten.

Unter der Laguna del Maule lagern 450 Kubikkilometer hochexplosives Magma

Unter dem Erdboden braut sich einiges zusammen, wie die Datenlage zeigte. »Ich möchte keine Panik verbreiten, doch es gibt Anzeichen für eine vermehrte Ansammlung von Magma unter der Laguna del Maule«, berichtet Judith Fierstein, Geologin am California Vulcano Observatory des Geologischen Dienstes der USA (USGS) in Menlo Park. Die Wissenschaftlerin hat die unterirdischen Strukturen mit seismischen Methoden analysiert, die elektrische Leitfähigkeit untersucht sowie gravimetrische Messungen vorgenommen und somit bestimmt, welche Gesteinstypen unter dem riesigen Gebiet lagern. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Region auf einem 450 Kubikkilometer großen Reservoir aus hochexplosivem rhyolithischem Magma sitzt. Wenn dieses auf einen Schlag ausgeworfen wird, kann es sich in 1000 Kubikkilometer Asche, Vulkangestein und Lava verwandeln. Ab einer solchen Menge kann man von einem Supervulkan sprechen, so Singer.

Auch wenn nicht das gesamte Magma auf einen Schlag herausgeschleudert wird, stellt es eine Bedrohung dar. Ein Zehntel dieses Volumens würde bereits zu einer Explosion führen, die diejenige des indonesischen Vulkans Krakatau um das Doppelte übertreffen würde. Als dieser 1883 ausbrach, fielen ihm 36000 Menschen zum Opfer. Dabei handelt es sich bei ihm noch gar nicht um einen Supervulkan.

Während ein Teil der Wissenschaftler die Größe der Laguna del Maule vermaß, interessierten sich andere mehr für deren Temperatur. Aus klassischer Sicht handelt es sich bei dem unter aktiven Vulkanen angesammelten Magma um eine brodelnde Flüssigkeit, die irgendwann zur Erdoberfläche aufsteigt, ähnlich wie ein Klumpen in einer Lavalampe. 2014 aber machten Adam Kent von der Oregon State University

AUF EINEN BLICK
SCHLAFENDE UNGEHEUER

1. Supervulkane können durch ihre Explosionen das Erscheinungsbild ganzer Kontinente verändern. Seit Beginn der Menschheit gab es keinen solchen Ausbruch.

2. Überraschenderweise beginnen solche gigantischen Ausbrüche nicht mit glutflüssigem Magma, sondern mit nahezu festem Gestein. Wissenschaftler erkunden, wie dieses in kurzer Zeit mobilisiert wird.

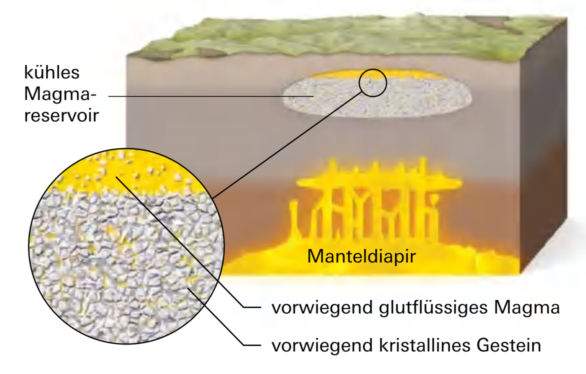
3. An der Laguna del Maule, einem Bergsee in den Anden, braut sich ein riesiger Vulkankomplex zusammen. Sein Magmareservoir ist bereits jetzt groß genug für einen Supervulkan.

Kaltstart für Supervulkane

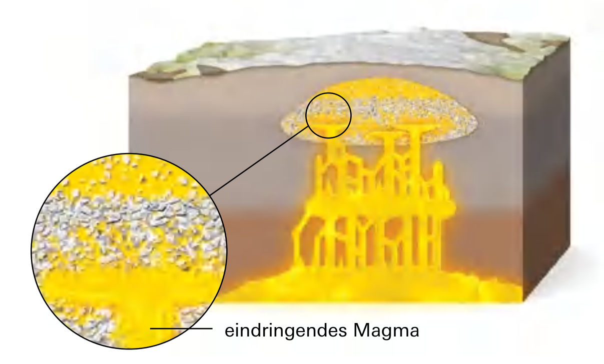
Die größten Vulkane der Erde speisen sich nicht aus ständig brodelnden Magmakesseln. Nach neuen Erkenntnissen besitzen sie vielmehr ein relativ kaltes Innenleben aus nahezu festem Gestein. Wissenschaftler postulieren zwei Mechanismen, wie dieses sich binnen Kurzem so stark erhitzen kann, dass es zur Explosion kommt.

Aufsteigender Manteldiapir

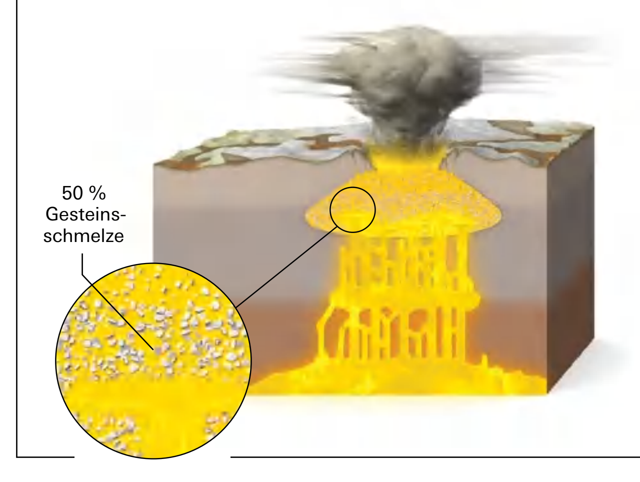
1 Einige Supervulkane, etwa derjenige unter dem Yellowstone-Park im Westen der USA, sitzen über einem Diapir aus aufsteigendem Magma. Näher an der Oberfläche befindet sich ein kühleres Reservoir aus vorwiegend kristallinem und zu einem kleineren Teil glutflüssigem Magma.



2 Gesteinsschmelze aus dem Manteldiapir strömt im Lauf von Jahrtausenden allmählich nach oben, kommt in Kontakt mit der kleineren Kammer nahe der Oberfläche und erhitzt diese.

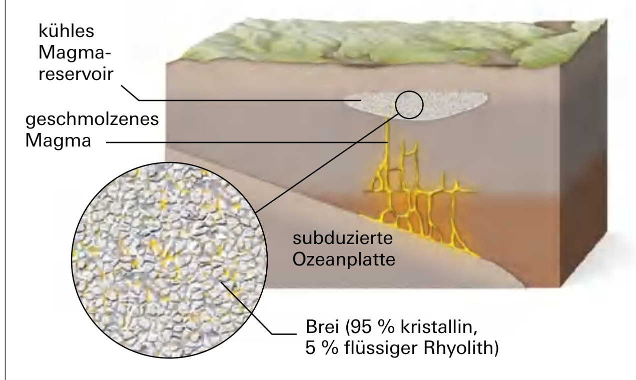


3 Die erhitzten Kristalle schmelzen rasch, möglicherweise binnen Jahrzehnten, und bilden eine explosive Masse, die in einer gigantischen Eruption an die Oberfläche schießt.

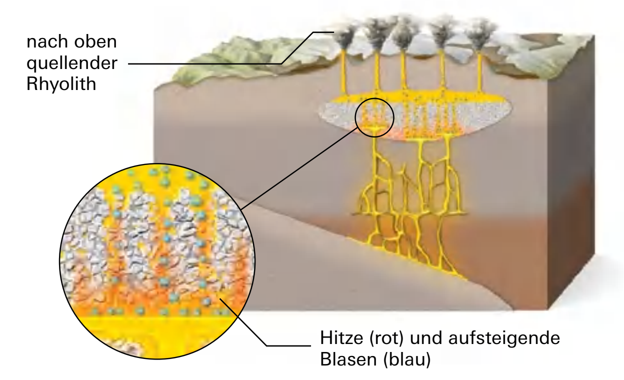


Zerberstende Blasen

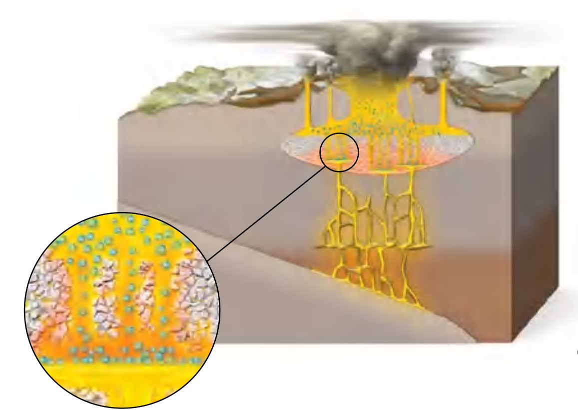
1 Vulkankomplexe wie die Laguna del Maule in Chile liegen über zwei kollidierenden Krustenplatten, die tief im Erdinnern heißes Magma erzeugen. Darüber liegt ein Reservoir aus kaltem Kristallbrei mit einer klebrigen Gesteinsschmelze aus Rhyolith.



2 Wenn flüssiges Magma mit dem Reservoir in Kontakt kommt, schmelzen die dortigen Kristalle durch die Hitze. Während die Schmelze in der Kammer steigt, entweichen Wasserdampfblasen und drängen nach oben. Binnen Jahrzehnten können Hitze und aufsteigende Blasen den flüssigen Rhyolith nach oben und herausdrücken, wodurch es zu kleineren Eruptionen kommt.



3 Die Blasen sammeln sich an der Spitze des Reservoirs und drängen noch mehr Rhyolith in die Gesteinsporen. Gelangt die Schmelze dicht unter die Oberfläche, dehnen sich die Blasen durch den Druckabfall rasch aus. Heftige Eruptionen, unter Umständen in supervulkanischen Größenordnungen, können die Folge sein.



und Kari Cooper von der University of California in Davis eine überraschende Entdeckung, die viele Fachleute umdenken ließ. Demnach könnten manche Vulkane von vergleichsweise kühler Natur sein.

Kent und Cooper untersuchten winzige Kristalle aus Ablagerungen des Vulkans Mount Hood in Oregon. Bevor diese Strukturen an die Erdoberfläche gelangten, waren sie in der darunterliegenden Magmakammer herangewachsen. Dabei hatte sich eine Schicht nach der anderen gebildet, ähnlich wie bei Baumringen. Die einzelnen Lagen dokumentieren die Entwicklung des Magmas, etwa Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, des Drucks und der Temperatur. Aus den Kristallen von Mount Hood war abzulesen, dass die Temperatur des Magmas fast die gesamte Zeit über zu niedrig für eine Eruption gewesen war. Es handelte sich dabei nicht wirklich um eine Flüssigkeit, sondern eher um einen Brei: ein schwammartiges Netz aus Kristallen mit Gesteinsschmelze in den dazwischenliegenden Poren.

Es sieht ganz so aus, als ob das auch bei anderen Vulkanen der Fall sein könnte: 2017 führten Cooper und ihre Kollegen die gleiche Analyse an Kristallen aus der Vulkanzone von Taupo im Zentrum der neuseeländischen Nordinsel durch, wo mehrere Supervulkanausbrüche stattgefunden haben. Dort hatten die Kristalle ebenfalls den größten Teil der Zeit in eher kaltem, festem Magma gelegen, wie die Wissenschaftler herausfanden. Ende 2017 schließlich analysierte Singer mit seinem Team die vulkanischen Ablagerungen der Supereruption im Long Valley in Kalifornien und kam zu einem ähnlichen Ergebnis. Und auch die Magmakammer von Yellowstone enthält einen relativ kühlen Kristallbrei.

Obwohl Kent und Cooper Hinweise auf etwas höhere Temperaturen des Magmas in ein paar älteren Vulkangebieten in Nord- und Südamerika fanden, scheinen Supervulkane bis kurz vor ihrer Eruption im Allgemeinen eher niedrigere Temperaturen zu besitzen. Wie Coopers Arbeiten in Taupo ergaben, verflüssigten sich die dortigen Systeme erst 40 Jahre vor dem Ausbruch. Im Long Valley fand die Mobilisierung binnen Jahrzehnten bis einigen Jahrhunderten statt, beim Yellowstone-Vulkan dauerte sie ebenfalls nur Jahrzehnte. Cooper meint, das seien eher konservative Schätzungen, und so könnten sich die Systeme sogar innerhalb nur weniger Jahre verflüssigt haben.

Zurück zur Laguna del Maule: Bei der dortigen gewaltigen Magmaansammlung dürfte es sich ebenso um einen Kristallbrei handeln. Singer und seine Kollegen meinen, das System bestünde zu 95 Prozent aus Kristallen und nur zu 5 Prozent aus flüssiger Schmelze. Der Brei ist mit rund 800 Grad Celsius auch nicht besonders heiß. Zum Vergleich: Die Lavamassen, die im Sommer 2018 die Hänge des Kilauea auf Hawaii hinabflossen, hatten eine Temperatur von etwa 1200 Grad Celsius. Offenbar können die kaltherzigen Feuerriesen also im Nu erwachen. Der Geologe Nathan Andersen von der University of Oregon stellte bei der Analyse der kleinen Kristalle aus den jüngsten Lavaströmen der Laguna del Maule fest, dass sie sich nur 10 bis 100 Jahre lang in flüssigem Magma befunden hatten.

Flüssiges Magma oder heiße Bläschen könnten die Gesteinsmassen rasch schmelzen

Hier stellt sich allerdings die Frage, wie diese erstarrten Systeme so rasch schmelzen und in Bewegung geraten können. Im Yellowstone-Gebiet fand die letzte große Supereruption statt, als flüssiges Magma durch das Erdinnere aufstieg und auf ein höher gelegenes, verfestigtes Reservoir traf, erklärt die Geologin Christy Till von der Arizona State University. Sie kann die damaligen Vorgänge nur in groben Zügen umreißen, schließlich war noch niemand mit Messgeräten vor Ort. Doch die vulkanischen Ablagerungen lassen erkennen, dass sich die emporquellende Flüssigkeit mit den schmelzenden Kristallen vermischte. Das heizte die gesamte Magmakammer auf, und der Druck erhöhte sich durch die hinzukommende Flüssigkeit so lange, bis diese explosionsartig in die Luft geschleudert wurde.

In Chile wiederum kann sich auch etwas völlig anderes abspielen. »Es gibt kein allgemein gültiges, für alle Supervulkane zutreffendes Modell«, bemerkt Till. Yellowstone etwa sitzt, anders als die Laguna del Maule und das Long Valley, auf einem heißen Diapir. An solchen Stellen taucht eine Erdkrustenplatte unter eine angrenzende, wobei Gestein schmilzt und sich in Magma verwandelt. Der Auslöser einer Eruption ist dann ein anderer, sagt Andersen. Es wird

Kurz erklärt

Das vulkanische Gestein **Rhyolith** besteht zu einem Großteil aus Silikaten und entspricht chemisch und mineralogisch dem Granit. Bei seiner Entstehung bilden sich zunächst durch langsames Erkalten von Magma im Erdinnern große Kristalle. Steigt die Masse anschließend schnell auf, kühlt sie rasch ab, und es entsteht eine Struktur aus kleinen Kristallen, in der die großen eingeschlossen sind. Rhyolith ist meist grau, hellgrün oder hellrot und wird unter anderem für Pflastersteine oder als Füllmaterial verwendet. In Deutschland findet man es in vielen Mittelgebirgen, zum Beispiel im Harz, Odenwald oder Thüringer Wald.

Als **Diapir** oder auch Manteldiapir bezeichnet man einen Strom heißen Materials, das aus dem Erdmantel aufsteigt. Stößt der Strom auf die feste Gesteinsschicht der Lithosphäre, wird er gebremst und breitet sich pilzförmig nach den Seiten aus. Die heiße Masse schmilzt das darüberliegende Gestein, und es bildet sich flüssiges Magma, das durch einen Vulkanausbruch an die Oberfläche gelangen kann. Mit der Zeit entsteht wie am Fließband eine Kette von Vulkanen, da sich die tektonische Platte langsam über den ortsfesten Diapir hinwegschiebt. Ein prominentes Beispiel für diesen Hotspot-Vulkanismus ist die Vulkankette von Hawaii.



NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS AND THE U.S./JAPAN ASTER SCIENCE TEAM (EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/IMAGES/76827/LAGUNA-DEL-MAULE)

Die Satellitenperspektive auf die vulkanischen Strukturen rund um die Laguna del Maule zeigt Vegetation (rot) und schneebedeckte Gipfel (weiß).



BRAD S. SINGER, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

Geologen installieren in der Umgebung des Sees Messgeräte, um zu ermitteln, wie stark sich der Boden hebt.

nur ein Teil des Vulkanreservoirs erhitzt, außerdem spielen explodierende Dampfblasen eine Rolle.

Andersen fand durch die Analyse von Kristallen der letzten Ausbrüche an der Laguna del Maule heraus, dass aus großen Tiefen stammendes, basaltisches Magma nicht in alle Stellen des Vulkansystems eindrang, sondern sich vielmehr an der Basis des oberen, stark rhyolithhaltigen Reservoirs ansammelte. Die beiden Gesteinstypen haben sich also niemals vermischt. Der stecken gebliebene Basalt kühlte ab, gab dabei Wärme an das darüberliegende Material weiter und ließ Wasserdampfbläschen aufsteigen. Durch die Wärme und die heißen Blasen schmolzen die umliegenden Kristalle. So entstanden schwimmende, mit Blasen gefüllte Diapire, die weiter hinauf zur Spitze des Reservoirs wanderten. Dort übten sie so viel Druck aus, dass sie durch die darüberliegende Kruste brachen.

Diese Vorstellung beunruhigt Singer. Sollten derzeit flüchtige Bläschen unter der Laguna del Maule aufsteigen, gibt es für sie keinen Weg, zu entkommen. Denn in der Nähe des Bergsees sind keine hydrothermalen Strukturen wie etwa der Old-Faithful-Geysir im Yellowstone-Nationalpark, Fumarolen, heiße Quellen oder Kamine vorhanden. »In meinen Augen macht das die Laguna del Maule potenziell gefährlicher als andere Vulkansysteme«, urteilt der Geologe. Falls ein Teil des Gases zur Oberfläche gelangt, könnte sich das Wachstum des Reservoirs verlangsamen. »Sollte das Reservoir aber in der Tiefe festsitzen und dort ausreifen, könnte sich das Vulkansystem stark aufblähen, wie es im Yellowstone-Gebiet vor dem letzten großen Ausbruch geschehen ist«, ergänzt er. »Dann käme es zu einer Eruption, wie sie die Menschheit noch nicht gesehen hat.«

Obwohl das Reservoir unter der Laguna del Maule schon fast supervulkanische Ausmaße hat, könnte es also in den kommenden Jahrhunderten weiter anwachsen. Im Moment sind Singers Befürchtungen noch durchaus spekulativ, ebenso wie seine Annahmen über die Eruptionsmechanismen. So wäre es etwa denkbar, dass eine aufsteigende, bläschenreiche Schmelze von sich aus nicht genügend Druck aufbauen kann, um einen gewaltigen Ausbruch auszulösen. Dazu könnte ein lokales Erdbeben erforderlich sein. Singers Team versucht derzeit Hinweise auf solche zusätzlichen Auslöser zu finden.

Selbst wenn es an der Laguna del Maule »nur« zu einer Reihe kleinerer Eruptionen käme, wären die Auswirkungen wohl in ganz Südamerika zu spüren. So könnte die Asche den Flugverkehr zum Erliegen bringen und die landwirtschaftliche Produktion in Argentinien, wo sie vermutlich auf Grund der vorherrschenden Westwinde niederregnen würde, auf Jahre hinaus ruinieren. Außerdem wäre es möglich, dass Glutwolken einen Dammbruch am nahe gelegenen Río Maule herbeiführen, was eine katastrophale Überschwemmung zur Folge hätte. Talca, eine Stadt mit 200 000 Einwohnern in der Ebene unterhalb des Sees, könnte dann in den Fluten versinken.

Inzwischen haben Wissenschaftler aus Chile und Argentinien die Beobachtung des Sees übernommen. Derzeit hebt sich der Untergrund in der Region kontinuierlich – eine scheinbar relativ harmlose Bewegung. Doch sollten die Forscher weitere Anzeichen von Unruhe an der Laguna del Maule feststellen, könnten sie damit die nächste Eruption des Vulkanfelds exakt vorhersagen – jetzt, da sie die zu Grunde liegenden Mechanismen besser verstehen. ◂

QUELLEN

Andersen, N.L. et al.: Petrochronologic perspective on rhyolite volcano unrest at Laguna del Maule, Chile. Earth and Planetary Science Letters 493, 2018

Andersen, N.L. et al.: Incremental heating of Bishop Tuff Sanidine reveals preeruptive radiogenic Ar and rapid remobilization from cold storage. PNAS 114, 2017

Cooper, K.M., Kent, A.J.R.: Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. Nature 506, 2014

Rubin, A.E. et al.: Rapid cooling and cold storage in a silicic magma reservoir recorded in individual crystals. Science 356, 2017

LITERATURTIPP

Bindeman, I.N.: Die Urgewalt der Supervulkane. Spektrum der Wissenschaft 8/2006, S. 38–45
Mehr darüber, was Kristalle über Supervulkane verraten und wie sich ein Ausbruch weltweit auswirkt

ASTRONOMIE

DER EXOPLANET NEBENAN

Die Venus ist so groß wie die Erde und begann unter ähnlich lebensfreundlichen Bedingungen. Doch heute ist sie eine felsige Gluthölle. Forscher versuchen intensiv, die unterschiedliche Entwicklung zu verstehen – denn die Erkenntnisse weisen weit über unser eigenes Sonnensystem hinaus.





LISA QUINONES

M. Darby Dyar (links) ist Mineralogin am Mount Holyoke College in South Hadley, Massachusetts und am Planetary Science Institute in Tucson, Arizona. Sie untersucht die Himmelskörper des Sonnensystems spektroskopisch. Die Astronomin **Suzanne E. Smrekar** (Mitte) hat sich auf die Entwicklung von Felsplaneten spezialisiert und ist stellvertretende Chefwissenschaftlerin der NASA-Marsmission InSight. **Stephen R. Kane** ist Astrophysiker am Department of Earth Sciences der University of California, Riverside und war an der Entdeckung Hunderter von Exoplaneten beteiligt.

⏩ spektrum.de/artikel/1654762

NASA / JPL (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PIA00268)

Als 1982 die neu gewählte Reagan-Administration umfangreiche Kürzungen bei der US-Weltraumforschung beschloss, erschütterte das die gesamte Abteilung für Planetologie am Massachusetts Institute of Technology. Eines der Opfer war die seinerzeit geplante NASA-Mission Venus Orbital Imaging Radar. Doch schnell kratzten die Wissenschaftler bereits vorhandene Teile zusammen, die von anderen Missionen übrig geblieben waren, und schmiedeten damit Pläne für eine preiswertere Raumsonde, die nur noch 680 Millionen US-Dollar kosten sollte.

Der so konzipierte Magellan-Orbiter startete 1989 zur Venus, 1990 war er am Ziel. In den darauf folgenden fünf Jahren lieferten die Instrumente planetenumspannende Radarbilder, Daten der Schwerkraft und eine topografische Karte der Venus. Magellan war die jüngste in einer langen Reihe sowjetischer und US-amerikanischer Missionen zu unserem Nachbarplaneten. Doch nachdem die Sonde 1994 planmäßig auf die Oberfläche der Venus gestürzt war, endete mit ihr auch das Interesse der NASA an weiteren Flügen zu dem erdgroßen Himmelskörper. Seither haben Planer gut zwei Dutzend Vorschläge für neue Missionen eingereicht, doch keiner wurde genehmigt. Die von Magellan gesammelten Daten liefern bis heute das beste Kartenmaterial.

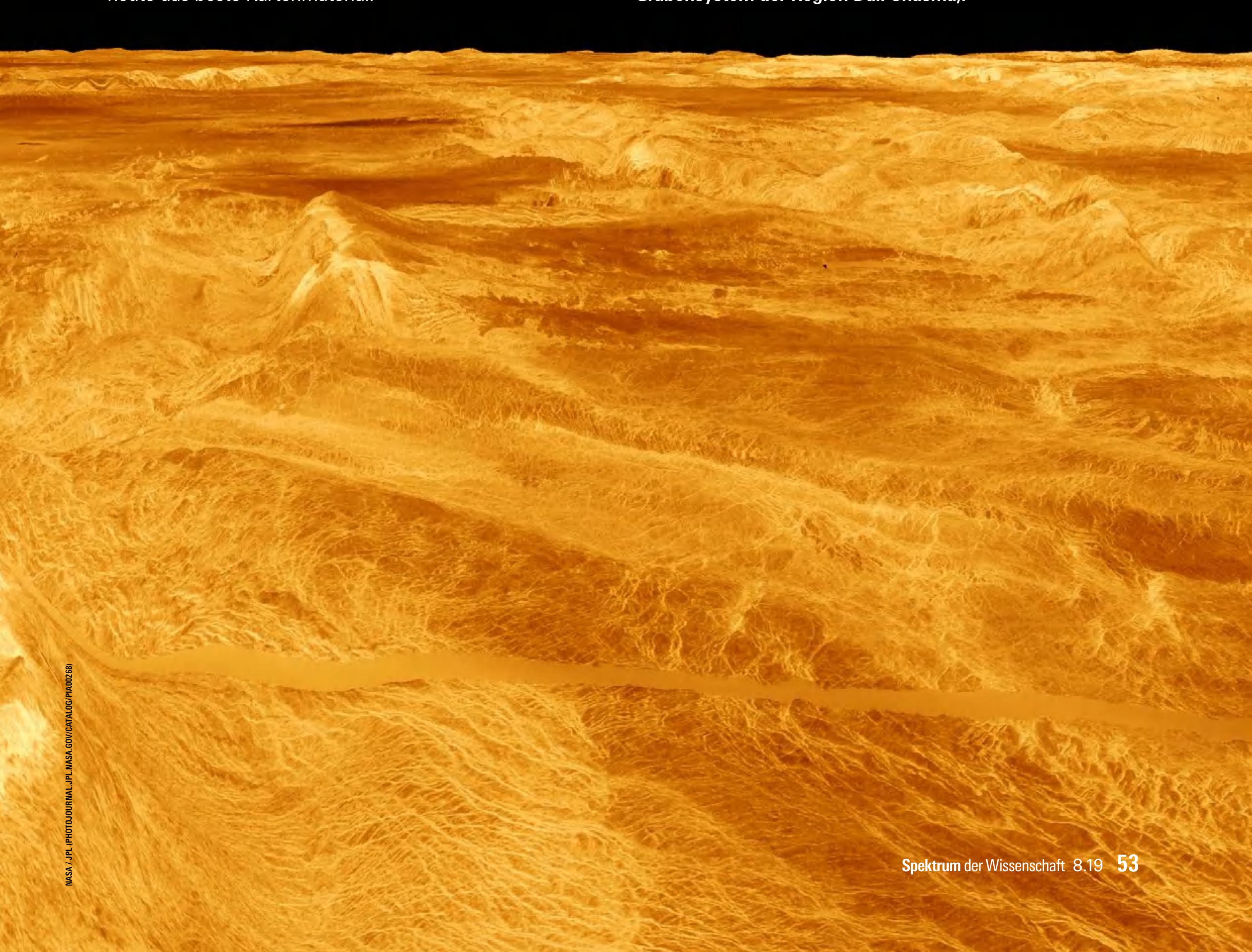
AUF EINEN BLICK
UNGLEICHER ZWILLING

1. Zur Zeit ihrer Entstehung herrschten auf Venus und Erde vergleichbare Bedingungen. Doch während Letztere Ozeane und eine lebensfreundliche Atmosphäre entwickelte, wurde Erstere äußerst unwirtlich.

2. Unser Nachbarplanet weist noch immer Vulkanismus auf, es gibt Hinweise auf eine beginnende Plattentektonik. Die Oberfläche steckt allerdings unter einer dichten Atmosphäre und ist schwer zu erforschen.

3. Die Antworten auf die Frage, warum sich die Venus so anders entwickelt hat, könnten auch Informationen über die vielen Felsplaneten um ferne Sterne liefern.

Auf Basis von Radarscans der Raumsonde Magellan lassen sich am Computer dreidimensionale Ansichten der Venusoberfläche erstellen (hier das Grabensystem der Region Dali Chasma).



NASA / JPL (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PIA00268)

In der Zwischenzeit haben die europäischen und japanischen Raumfahrtagenturen mit erfolgreichen Missionen zur Venus das Spielfeld betreten. Das hat zu Durchbrüchen beim Verständnis der Atmosphäre geführt und zusammen mit neuen Analysen der Magellan-Messungen Erkenntnisse gebracht, mit denen einige Lehrbücher umgeschrieben werden müssen. Die Venus scheint vulkanisch aktiv zu sein, und es gibt sogar Hinweise auf eine beginnende Plattentektonik. Solche Vorgänge halten viele Wissenschaftler für eine Voraussetzung für die Entstehung von Leben. Theoretische Modelle deuten auch darauf hin, dass die Venus relativ lange flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche gehalten hat.

Diese Erkenntnisse fallen mit einer weiteren erstaunlichen Entwicklung in der Astronomie zusammen: der Entdeckung von Tausenden von Exoplaneten in anderen Sonnensystemen. Viele sind etwa so groß und so weit von ihren Sternen entfernt wie die Venus. Alles, was wir über den Planeten nebenan erfahren, könnte das Verständnis solcher unzugänglich fernen Welten verbessern. Wenn wir herausfinden, ob und wann auf der Venus lebensfreundliche Bedingungen geherrscht haben, können wir auch die Chancen auf Leben auf den venusähnlichen Himmelskörpern in der übrigen Milchstraße besser einschätzen.

Die meisten der bisher entdeckten Exoplaneten wurden mit der Transitmethode gefunden. Dabei untersuchen Astronomen verräterische Helligkeitsschwankungen von Sternen, die auftreten, wenn Planeten vorbeiziehen. Die Technik liefert deren Größe, doch die allein sagt noch nicht viel aus. Würde ein außerirdischer Beobachter unser Sonnensystem mit der Transitmethode betrachten, erschienen Venus und Erde fast identisch. Dabei ist Erstere völlig unbewohnbar, während die Erde seit rund vier Milliarden Jahren komplexe Ökosysteme beherbergt.

Wir können zwischen ähnlich großen Planeten näher differenzieren, indem wir deren Abstände zu ihren Sternen messen. Die »habitable Zone« ist die Region, in der ein felsiger Planet zumindest theoretisch flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche haben könnte (siehe Grafik S. 56). Bei der Erde ist das offensichtlich der Fall. Doch auch die Venus befand sich früher in jenem Bereich – womöglich sogar eine ganze Weile. Die Grenzen der habitablen Zone verschieben sich mit der Zeit nach außen, weil die Sonne mit zunehmendem Alter intensiver leuchtet. Inzwischen liegt unser ungleicher Zwilling in der nach ihm benannten Venuszone. In dieser verursacht verdampfendes flüssiges Wasser einen »galoppierenden Treibhauseffekt«, der letztlich die Ozeane zum Kochen bringt und völlig verschwinden lässt.

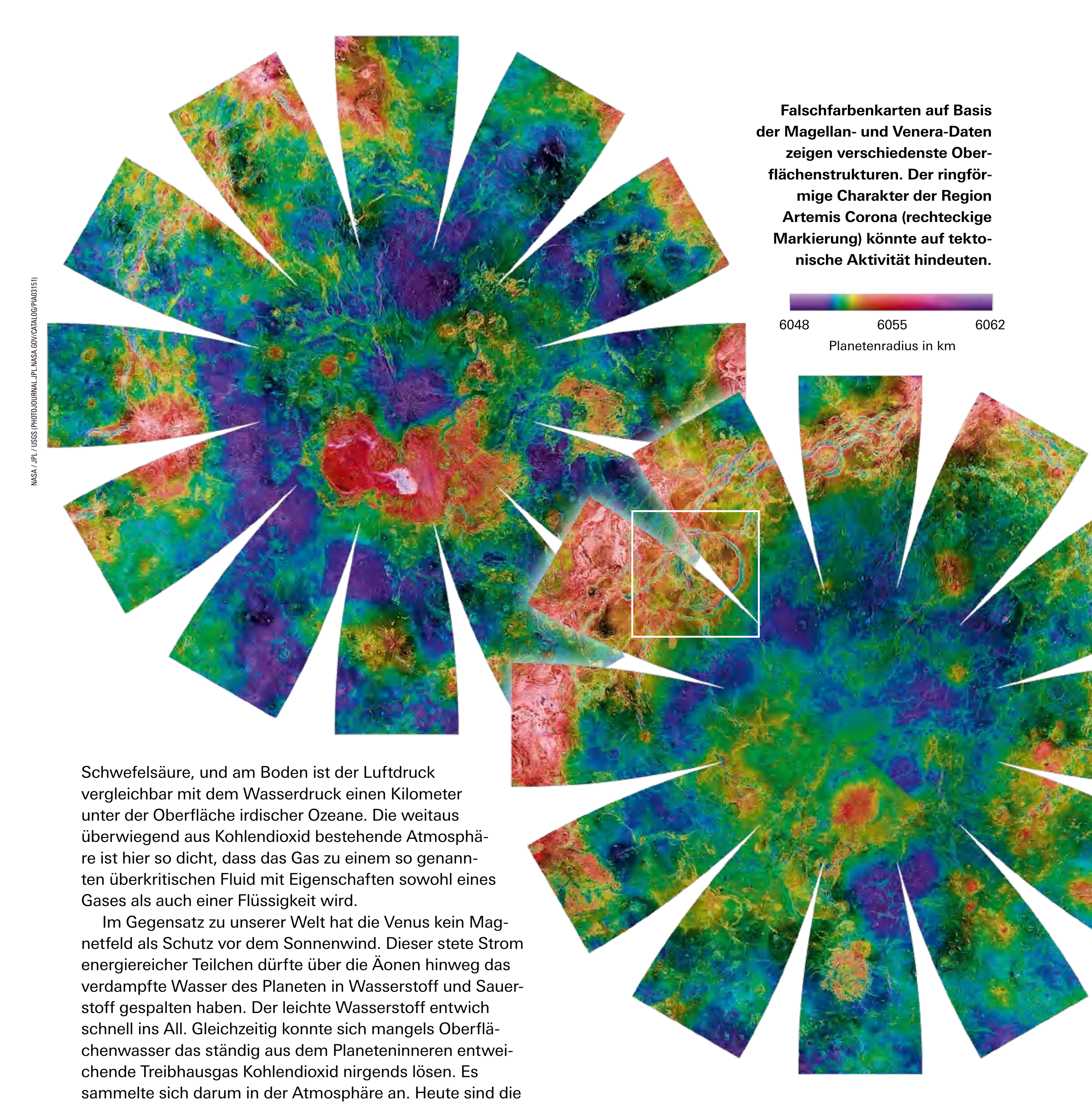
Heißes Ende nach viel versprechendem Start

Ursprünglich bildeten sich Venus und Erde unter sehr ähnlichen Bedingungen. Wahrscheinlich brachten Kometen Eis auf die Oberflächen beider Planeten. Simulationen der frühen Venus zeigen, dass es hier wohl eher flüssiges Wasser gab als auf der Erde. Es könnte sich bis vor etwa einer Milliarde Jahren dort gehalten haben. Doch heute ist die Venus äußerst unwirtlich. Wie kam es dazu? Ist die Venus vielleicht sogar der Endzustand aller bewohnbaren Planeten dieser Größe, oder repräsentiert sie lediglich eines von vielen möglichen Schicksalen solcher Himmelskörper?

Unsere Suche nach Antworten wird zum Teil durch die dicke, nahezu undurchschaubare Atmosphäre des Planeten behindert (siehe Foto unten). Hoch oben liegen Wolken aus

Dicke, undurchsichtige Wolken hüllen die Oberfläche der Venus ein. Diese Falschfarbenaufnahme stammt aus dem Jahr 2018.

PLANET-C PROJECT TEAM (AKATSUKI.ISAS.JAXA.JP/EN/GALLERY/DATA/001161.HTML)



Falschfarbenkarten auf Basis der Magellan- und Venera-Daten zeigen verschiedenste Oberflächenstrukturen. Der ringförmige Charakter der Region Artemis Corona (rechteckige Markierung) könnte auf tektonische Aktivität hindeuten.

NASA / JPL / USGS (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PIA03151)

Schwefelsäure, und am Boden ist der Luftdruck vergleichbar mit dem Wasserdruck einen Kilometer unter der Oberfläche irdischer Ozeane. Die weitaus überwiegend aus Kohlendioxid bestehende Atmosphäre ist hier so dicht, dass das Gas zu einem so genannten überkritischen Fluid mit Eigenschaften sowohl eines Gases als auch einer Flüssigkeit wird.

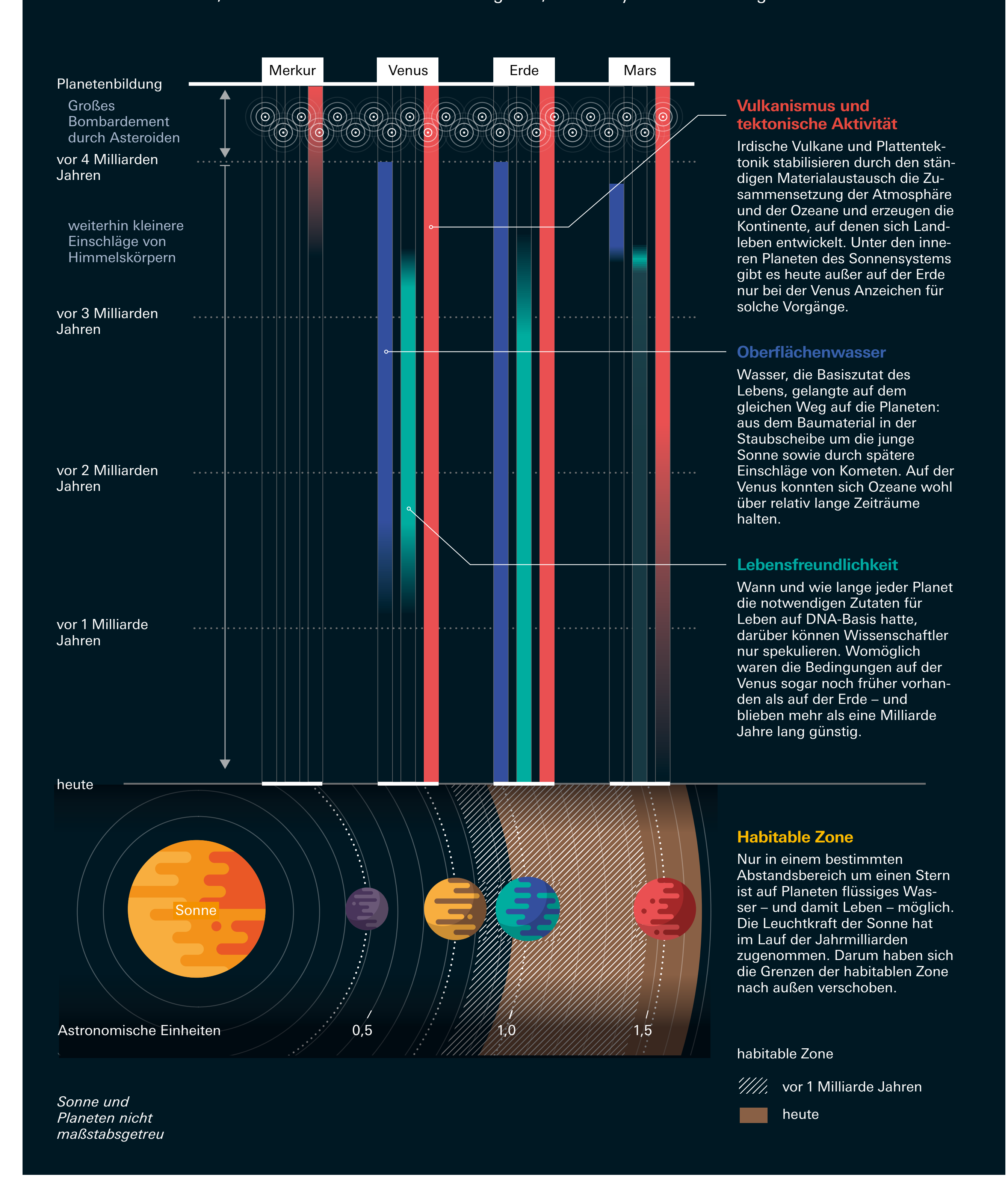
Im Gegensatz zu unserer Welt hat die Venus kein Magnetfeld als Schutz vor dem Sonnenwind. Dieser stete Strom energiereicher Teilchen dürfte über die Äonen hinweg das verdampfte Wasser des Planeten in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten haben. Der leichte Wasserstoff entwich schnell ins All. Gleichzeitig konnte sich mangels Oberflächenwasser das ständig aus dem Planeteninneren entweichende Treibhausgas Kohlendioxid nirgends lösen. Es sammelte sich darum in der Atmosphäre an. Heute sind die Temperaturen auf Grund des Treibhauseffekts durch das CO_2 auf der Venus mehr als 400 Grad Celsius höher als auf der Erde.

Die einzigen Daten, die wir direkt von der Oberfläche der Venus haben, stammen von sowjetischen Venera-Landesonden aus den 1970er und 1980er Jahren. Diese überlebten unter den extremen Bedingungen nur wenige Minuten, aber in der kurzen Zeit übertrugen sie immerhin einige Informationen über die chemische Zusammensetzung ihrer Umgebung. Darüber hinaus beruht unser mineralogisches Wissen vor allem auf umstrittenen Interpretationen von Radarmessungen aus dem Orbit und Spekulationen über chemische Reaktionen zwischen den Gesteinen und den Gasen des Planeten bei den dort herrschenden Drücken und Temperaturen.

Inzwischen fanden Forscher jedoch heraus: Es ist möglich, die Gesteine auf der Venus von der Umlaufbahn aus zu kartieren. Dazu muss man gewissermaßen durch geeignete Fenster im elektromagnetischen Spektrum schauen, bei denen Strahlung nicht vom Kohlendioxid in der Atmosphäre absorbiert wird. Glücklicherweise lassen sie gerade in Bereiche blicken, wo sich die für Vulkangestein typischen Minerale Olivin und Pyroxen bemerkbar machen. Vielleicht könnten wir so endlich die Zusammensetzung des Planeten

Planetenschicksale im Vergleich

Die Frage, was Planeten lebensfreundlich macht, ist eines der größten ungelösten Rätsel der Astronomie. Erde und Venus hatten vergleichbare Startbedingungen, doch Letztere ist heute eine glühend heiße Ödnis. Forscher untersuchen, wie sich der Vulkanismus, die Plattentektonik und weitere Bedingungen entwickelt haben. So wollen sie herausfinden, welche Zutaten für eine Welt nötig sind, die Ökosysteme beherbergen kann.



TIFFANY FARRANT-GONZALEZ / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2019

genauer bestimmen. Die europäische Raumsonde Venus Express, die von 2006 bis 2014 den Planeten untersucht hat, nutzte eines der Fenster. Damit erstellten Forscher für einen Großteil der Südhalbkugel die erste Übersicht der von der Oberfläche ausgestrahlten Wärme. Die Daten enthalten auch spektrale Informationen, das heißt charakteristische Ausschläge in den Intensitätskurven, mit denen sich Minerale im Boden identifizieren lassen.

Auf der Karte fallen zudem zahlreiche so genannte Hotspots auf. Solche Gebiete geben so viel Wärme ab, dass die wahrscheinlichste Erklärung dafür ein junger Vulkanismus ist. Die Venus ist also wohl noch geologisch aktiv, im Gegensatz etwa zum Mond, der in dieser Hinsicht seit langer Zeit ruhig ist, und zum Mars, wo Vulkanismus bestenfalls vereinzelt vorkommt.

Vielleicht zeigt die Venus gerade, wie Plattentektonik ihren Anfang nimmt

Auf der Erde hängt der Vulkanismus mit der Plattentektonik zusammen, also der Bewegung von Teilen der Kruste gegeneinander. Sie ist für die vielen geologischen Formationen auf unserem Planeten verantwortlich und hat außerdem langfristige Klimazyklen stabilisiert. Das hat höher entwickeltes Leben auf der Erde begünstigt oder gar erst ermöglicht (siehe »Leben durch Plattentektonik«, **Spektrum** März 2019, S. 42). Tektonische Vorgänge bilden neue Kruste an den mittelozeanischen Rücken der Erde und schieben an anderen Stellen Teile zurück in den Mantel. Beide Prozesse erlauben es unserem Planeten, Wärme und chemische Verbindungen zwischen seinen inneren und äußeren Bereichen auszutauschen. Vulkanismus bringt Wasser an die Oberfläche, hält die Atmosphäre in einem gewissen Gleichgewicht und schafft Lebensraum oberhalb des Meeresspiegels. Aus diesen und weiteren Gründen ist die Frage, ob die Venus solche Phänomene aufweist – und warum oder warum nicht – für viele Forscher so wichtig.

Spärlichen Daten zufolge begann die Plattentektonik auf der Erde vielleicht schon vor vier Milliarden Jahren. Nur wenige Spuren haben sich bis heute erhalten. Jedenfalls wissen wir nicht wirklich, wie ein mit Basalt und möglicherweise bereits mit Ozeanen bedeckter Planet zu einem komplizierten System beweglicher Platten übergeht. Eine Hypothese lautet: Heißes Material aus dem Inneren dringt nach oben, was die Kruste und den äußeren Mantel (zusammen Lithosphäre genannt) schwächt. Die Oberfläche bricht auf, und die unter Druck stehende Gesteinsschmelze kann zu heftigem Vulkanismus führen, wie er sowohl auf der Erde als auch auf der Venus vorkommt. Die Last des ausgetretenen Materials auf der gerissenen Lithosphäre kann die betroffenen Teile absinken lassen und eine Subduktion herbeiführen, wobei eine Schicht unter eine andere gleitet. Wenn der Prozess oft genug stattfindet, stößt das die Plattentektonik an.

Eventuell geschieht das gerade auf der heutigen Venus. Die Lithosphäre auf der Venus ist heiß und dünn – wohl wie seinerzeit bei der Erde. Gewisse Regionen erinnern frappierend an terrestrische Subduktionszonen. Ein Beispiel ist Artemis Corona, eine kreisartige Formation in der Nähe des Venusäquators (siehe Karte auf S. 55). Ihre Größe entspricht etwa der des Aleutengrabens, einer Vertiefung des Meeresbodens vor der Küste Alaskas. Solche Merkmale könnten Stellen auf der Venus kennzeichnen, an denen Material aus dem Mantel an die Oberfläche steigt und auf die Kruste drückt. Auch Laborexperimente und Computersimulationen deuten darauf hin, dass es sich hier um Subduktionszonen handelt.

Die bislang vorliegenden Bilder haben eine zu geringe Auflösung, um das sicher zu beurteilen. Aber anscheinend befindet sich die Tektonik auf der Venus im Anfangsstadium ihrer Entwicklung. Die Magellan-Bilder zeigen keine Hinweise auf miteinander verbundene Platten – vielmehr sehen wir vereinzelte Stellen, an denen die Subduktion beginnt, jeweils um solche kreisförmigen Regionen mit aufsteigendem Material. Doch warum kam es nicht früher dazu, und wie wird es weitergehen? Sofern sich die Venus im Lauf der Zeit abkühlt, können die jetzt entstehenden Verwerfungen überdauern, und der Planet durchliefe vielleicht den gleichen Übergang zur Plattentektonik wie damals die Erde. Möglicherweise sind dieser Prozess und die damit verbundene Stabilisierung der Atmosphäre nicht nur in unserem Sonnensystem üblich, sondern auch bei Exoplaneten.

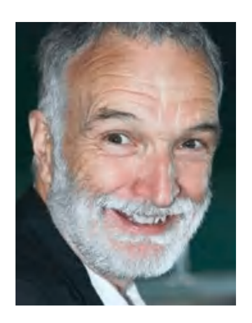
Es gibt also gewichtige Gründe für weitere Missionen zum Nachbarplaneten. Mit genaueren Bildern und Spektren könnten Wissenschaftler zentrale Fragen zum Vulkanismus und zur Plattentektonik der Venus beantworten. Die NASA entscheidet im Rahmen ihres Discovery-Programms regelmäßig über kleine, verhältnismäßige kostengünstige Missionen. Zwei von uns (Smrekar und Dyar) sind an der Planung einer vorgeschlagenen Raumsonde namens VERITAS beteiligt (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy). Sie würde die Oberfläche viel detaillierter erfassen und hätte neben einer Kamera auch ein Spektrometer an Bord. Weitere Arbeitsgruppen erstellen ebenfalls Konzepte. So könnte eine neue Generation von Planetologen die Chance bekommen, besser zu verstehen, warum unsere Nachbarin einen so anderen Weg gegangen ist als die Erde, und mehr über die Entwicklungen in Erfahrung zu bringen, die solche Himmelskörper lebensfreundlich machen. ◂

QUELLEN

Davaille, A.: Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus. Nature Geoscience 10, 2017

Way, M.J. et al.: Was Venus the first habitable world of our Solar System? Geophysical Research Letters 43, 2016

SCHLICHTING! PHYSIK AM FLUGZEUGFENSTER



Über den Wolken herrschen außerhalb des Flugzeugs dramatisch andere Temperaturen und Drücke als in der Kabine. An den Scheiben, die beide Reiche voneinander trennen, kommt es so zu eindrucksvollen optischen und thermodynamischen Phänomenen.

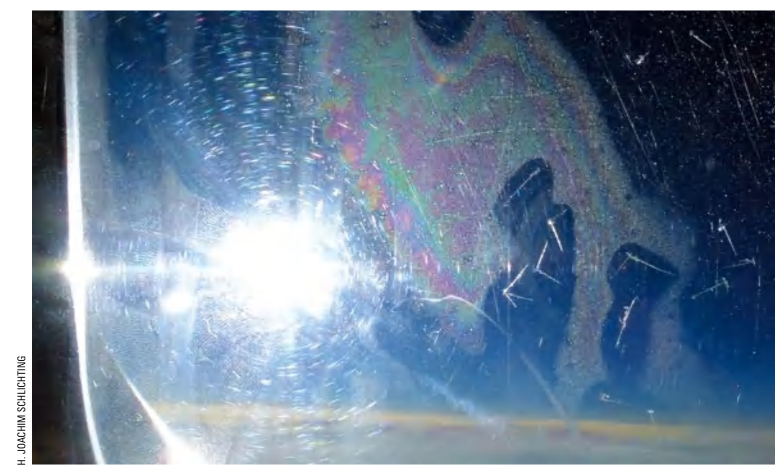
H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1654764

Doch still, was schimmert durch das Fenster dort?
William Shakespeare (1564–1616)

Die Konstrukteure von Flugzeugen würden wohl am liebsten ganz auf Fenster verzichten, denn diese sind Schwachstellen im Flugzeugrumpf. Das liegt am Druckunterschied: In der heute üblichen Reisehöhe von zirka zehn Kilometern beträgt der Luftdruck nur noch etwa ein Viertel des Normalwerts auf der Erdoberfläche von rund 1000 Hektopascal (hPa). Das wäre für die Passagiere lebensgefährlich. Die meisten von uns sind niedere Regionen gewohnt und ertragen für längere Zeit allenfalls einen Druck, wie er etwa auf der Zugspitze herrscht. Entsprechend werden in der Kabine etwa Dreiviertel (750 hPa) des normalen Atmosphärendrucks aufrechterhalten. Wegen des innen höheren Drucks unterliegt der Rumpf großen Belastungen, ähnlich wie ein aufgeblasener Luftballon. Ecken an Fenstern würden die Kräfte ungleichmäßig verteilen und wären Ansatzpunkte für Risse. Darum ist die vertraute, abgerundete Form weniger eine Frage des Designs als schlicht physikalische Notwendigkeit.

Flugzeugfenster bestehen aus drei Kunststoffscheiben. Die äußere ist etwa einen Zentimeter dick und fest mit dem Rumpf verbunden. Zwischen ihr und der mittleren Scheibe befindet sich zur Wärmedämmung Luft. Diese kann durch ein winziges Loch in der mittleren Scheibe hin- und herfließen, so dass letztlich der gesamte Druckunterschied auf dem äußeren Fenster lastet. Die innerste Scheibe befindet sich in einigem Abstand dazu und ist nicht sicherheitsrelevant – sie soll vor allem Passagiere von der Berührung der mittleren abhalten. Das schützt nicht nur das Acrylglas, sondern bei Außentemperaturen von bis zu minus 60 Grad Celsius ebenso die Passagiere vor unangenehmen Kälteempfindungen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Mehrere physikalische Erscheinungen am Flugzeugfenster beeinträchtigen den Blick auf die Außenwelt. Zu den von Wasserdampf und Eis verursachten Phänomenen kommen hier noch viele kurze, konzentrische Streifen um die Sonne. Sie entstehen, weil in den (zufällig verteilten) Kratzern auf der Scheibe gerade diejenigen Einkerbungen das Licht ins Auge reflektieren, die senkrecht zu den Strahlen orientiert sind. Ein ähnlicher Effekt entsteht auf welligen Gewässern bei tief stehender Sonne.

Die Fenster bieten den Reisenden einen außergewöhnlichen Blick auf die Landschaft sowie auf eine Vielzahl physikalischer Phänomene. Dazu gehören nicht nur die von mir bereits in früheren Ausgaben beschriebenen Halos, Glorien und Wolkenstrukturen, sondern auch Erscheinungen, die entstehen, indem das Flugzeugfenster selbst mit der Umgebung wechselwirkt. Manchmal zeigen sich gleich mehrere interessante Effekte zur selben Zeit (siehe Foto oben). In Häusern sind bei Mehrfachverglasung die Zwischenräume der Scheiben luft-



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Acrylglasscheiben sind optisch doppelbrechend, das heißt, sie brechen Licht abhängig von dessen Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung. Da das Himmelslicht teilweise polarisiert ist, zeigen sich oft regenbogenähnliche Farben, wenn sich die in den Fenstern abgelenkten Anteile passend überlagern.

dicht von der Außenwelt getrennt. Einer der Vorteile davon: Die Glasinnenflächen kommen nicht mit Wasserdampf in Berührung, der kondensieren und den Durchblick trüben kann. Allerdings reagieren solche Scheiben empfindlich auf Änderungen des Drucks in der Umgebung und verformen sich, wenn er nicht genau dem Gasdruck im Zwischenraum entspricht. Das macht sich vor allem indirekt durch optische Phänomene bemerkbar (siehe »Umkränztes Lichtkreuz im Quadrat«, **Spektrum** August 2017, S. 64).

So eine versiegelte Bauweise würden Doppelscheiben bei den großen Druckunterschieden am Flugzeug mechanisch kaum überstehen – daher das kleine Loch zum Ausgleich mit dem Kabineninnern. Das geht jedoch oft auf Kosten der Durchsicht. Doch wie zur Entschädigung für die Blicktrübung lassen sich dann am Acrylglas interessante Vorgänge beobachten, die man woanders kaum zu Gesicht bekäme (siehe »Wie vergitterte Fenster die Welt einfärben«, **Spektrum** Februar 2013, S. 54).

Zuerst zeigt sich im mittleren Bereich des Außenfensters ein deutlicher Belag mit winzigen Tröpfchen. Denn aus der Kabine sind Luft und Wasserdampf mit einer höheren Temperatur in den kühlen Raum zwischen der äußeren und mittleren Scheibe geraten. Hier wird nun der Taupunkt unterschritten, das heißt der im doppelten Wortsinn überflüssige Dampf kondensiert zu feinen Tröpfchen. Sie schlagen sich an der kälteren äußeren Scheibe nieder. An sich sind die mikroskopisch kleinen Wasserperlen weitgehend durchsichtig; aber das Licht wird an ihnen gestreut, also abgelenkt (siehe »Vernebelte Durchsichten«, **Spektrum** November 2017, S. 70).

Auf verschiedenen Pfaden zu lebhaften Farben

Wenn der beschlagene Bereich in Regenbogenfarben erstrahlt, lässt das auf sehr kleine Tröpfchen schließen. An ihnen wird das von außen eintreffende Sonnenlicht gebeugt (siehe »Farbenschillernder Nebel«, **Spektrum** September 2012, S. 46): Das Licht löst an den Tropfen mehrere Elementarwellen in verschiedene Richtungen aus. Treffen sich solche Wellen, die geringfügig unterschiedliche Wege im jeweiligen Tropfen zurückgelegt haben, im Auge des Beobachters, fallen ihre Berge und Täler im Allgemeinen nicht mehr zusammen. Sie haben nicht mehr dieselbe »Phase«, und bei der Überlagerung löschen sich einzelne Wellenlängen des weißen Lichts aus, während sich andere verstärken. Das verändert die spektrale Zusammensetzung, wodurch sich die Lichtwellen nicht mehr zu Weiß addieren, sondern in irisierenden Farben erscheinen.

Wären die Tröpfchen einheitlich groß, würde man eine Korona sehen, ein in Spektralfarben leuchtendes System konzentrischer Ringe um die Sonne. So etwas entsteht in der Natur manchmal durch dünne Wolken. An beschlagenen Flugzeugfensterscheiben hingegen lassen sich voll ausgebildete Koronen nur selten beobachten. Meistens zeigen sich nur kleinere, unregelmäßige Bereiche einer Farbe.

Häufig wird der beschlagene und kolorierte Bereich der Scheibe von einigen offenbar trockenen und daher transparenten Stellen durchlöchert (siehe Foto linke Seite). Die Ursache dafür sind Eisnadeln, die an geeigneten Kristallisationskeimen entstanden sind. Während ihres Wachstums haben sie vom Wasserdampf gezehrt und dessen lokale Konzentration drastisch reduziert – so stark, dass Wassertröpfchen in unmittelbarer Nähe wieder verdunstet sind. Das Ergebnis sind klare, trockene Höfe um die Eisnadeln herum. Wie man an einigen Stellen erkennen kann, sind einige von ihnen zu größeren Bereichen zusammengewachsen. Ich konnte während des weiteren Flugs beobachten, wie mit der zunehmenden Kristallbildung schließlich fast der gesamte Tröpfchenbelag verschwand und mit ihm das Farbenspiel.

Die optischen Erscheinungen an den Scheiben hängen stark von den äußeren Bedingungen ab. Weil Letztere sich ständig ändern, sind auch Erstere meist nur von kurzer Dauer. Neben dem Vorbeiziehen weit entfernter Landschaften spielt also direkt am Flugzeugfenster ein zweiter, ebenfalls bemerkenswerter Film. ◂

INFORMATIK

MASCHINEN MIT MENSCHLICHEN ZÜGEN

Künstliche Intelligenzen werden uns zusehends ähnlicher: Neben einer schnellen Auffassungsgabe und Kreativität verfügen erste Algorithmen nun auch über die Fähigkeit, ihre Umgebung zu verstehen.



ADRIANNE MATHIOWETZ

George Musser ist Redakteur bei »Scientific American« und Autor populärwissenschaftlicher Bücher über Physik, etwa »Spooky Action at a Distance«.

spektrum.de/artikel/1654766

IMAGINIMA / GETTY IMAGES / ISTOCK

In den letzten Jahren haben Maschinen in vielen Bereichen eine ähnliche Leistungsfähigkeit wie wir Menschen erreicht, etwa wenn es darum geht, Gesichter zu erkennen oder Texte in andere Sprachen zu übersetzen – ganz zu schweigen von ihren Erfolgen in Brett- und Arcadespielen (siehe **Spektrum** November 2018, S. 72). Daher könnte man vielleicht erwarten, dass Computerwissenschaftler anfangen, auf die menschliche Intelligenz herabzublicken. Aber ganz im Gegenteil geraten die Forscher geradezu ins Schwärmen, wenn es um das menschliche Gehirn geht: Vor allem dessen Anpassungsfähigkeit und das breite Spektrum an Fähigkeiten erstaunt sie immer wieder.

Von solchen Eigenschaften sind Maschinen nämlich noch weit entfernt. Wenn eine künstliche Intelligenz (KI) auf eine Aufgabe trainiert wurde, fällt es ihr schwer, eine zweite, wenn auch ähnliche zu erlernen. Zudem ist nicht immer klar, wie sie zu ihrem Ergebnis kam; der rechnerische Vorgang ist ziemlich undurchsichtig. Doch das wohl bedeutendste Hindernis für zukünftige Entwicklungen ist, dass die meisten Programme nur sehr langsam lernen und dazu auch noch enorme Datenmengen brauchen, die nicht immer vorliegen.

Aus diesem Grund konzentrieren sich die – durchaus beeindruckenden – Erfolge des maschinellen Lernens auf einige ausgewählte Bereiche. Möchte man etwa eine Bilderkennungssoftware entwickeln, findet man haufenweise Beispielbilder von Katzen oder Prominenten, mit denen man das Programm trainieren kann. Bei anderen Datensätzen, etwa medizinischen Scans, ist das schon schwieriger.

Noch stehen Computer dem menschlichen Gehirn in einigem nach. Allerdings lassen neueste Fortschritte Maschinen menschlicher wirken denn je.

AUF EINEN BLICK
NETZWERKE TRAINIEREN NETZWERKE

1. Da neuronale Netze sich beim Lernen selbst anpassen, können sie sich mit Problemen beschäftigen, für die Menschen keine Lösung finden.

2. Eine Aufgabe besteht darin, künstliche Intelligenzen weiter zu verbessern. Somit nutzen Informatiker inzwischen neuronale Netze, um diese selbst zu optimieren.

3. Damit erzielten sie schon bedeutende Fortschritte. Unter anderem verliehen sie ihren Programmen eine bessere Auffassungsgabe, mehr Flexibilität und »Fantasie«.

IMAGINIMA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die enormen Ressourcen sind nicht das einzige Problem gegenwärtiger KIs. Inzwischen werden solche Algorithmen im Bank- und Rechtswesen eingesetzt, um Kredite zu bewilligen oder Gefängnisstrafen festzulegen. Die Programme sind allerdings eine Art Blackbox: Sie spucken ein Ergebnis aus, begründen es aber nicht. Gerade angesichts der aktuellen gesetzlichen Festlegungen wird eine nachvollziehbare Argumentation von Maschinen immer wichtiger: Mit der Datenschutz-Grundverordnung von 2018 gewährte die Europäische Union ihren Bürgern unter anderem das Recht, für jede automatisierte Entscheidungsfindung – sei es bei der Auswahl von Bewerbern für einen Job oder bei einem Gerichtsurteil – »aussagekräftige Informationen über die involvierte Logik« zu erhalten.

Diese Schwierigkeiten beschäftigen momentan etliche Forscher, die schon vielfältige mögliche Lösungsansätze entwickelt haben. Einige sind jedoch der Meinung, dass ein radikaler Umbruch nötig sei, um wirkliche Fortschritte zu erzielen (siehe **Spektrum** November 2018, S. 77).

Umso bemerkenswerter ist es, was Computerwissenschaftler in den letzten Jahren allein durch kleine Modifikationen erreicht haben. Eine schnelle Anpassung an neue Probleme, ein Verständnis der eigenen Umgebung und sogar Fantasie: Über solche menschlichen Attribute verfügen nun – zumindest in begrenztem Maß – auch Maschinen. Um das zu erreichen, mussten Wissenschaftler die vielen verschiedenen Möglichkeiten ausschöpfen, mit denen sich eine KI trainieren lässt.

Diese Möglichkeiten hängen aber davon ab, welche Art von KI man benutzt. Tatsächlich gibt es diverse Programmtypen, die man als KI bezeichnet: Entscheidungsbäume, Nächste-Nachbarn-Klassifikationen, Kernel-Methoden, neuronale Netze und so weiter. Über die Jahre wechselten sich die unterschiedlichen Ansätze in ihrer Beliebtheit ab. Zu den derzeitigen Favoriten zählen die neuronalen Netze, die dem Aufbau und der Funktion unseres Gehirns nachempfunden sind. Ein solches Netzwerk besteht aus etlichen Recheneinheiten, so genannten Neuronen, die typischerweise in mehreren Schichten angeordnet sind. Um ein derartiges Programm auf eine Aufgabe zu trainieren, etwa jene, Bilder zu erkennen, übergibt man der ersten Schicht die Beispieldaten, also die Pixel eines Bilds. Die innen liegenden, »versteckten« Schichten verarbeiten diese Daten durch arithmetische Operationen, so dass die letzte Schicht eine Ausgabe erzeugt, etwa eine Beschreibung des Bildinhalts.

Dem Gehirn nachempfunden

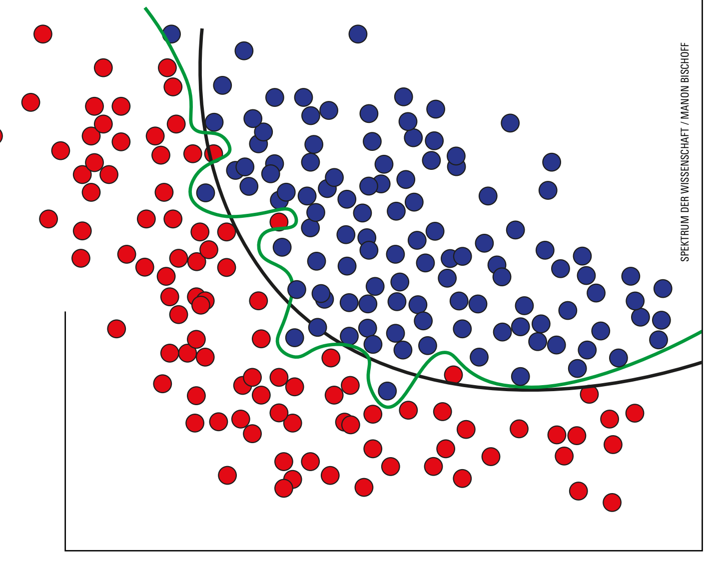
Auch neuronale Netze können sich in ihrer Struktur und ihrem Aufbau voneinander unterscheiden. Je nachdem, welches Problem man lösen möchte, eignet sich das eine oder andere Netzwerk besser. Für veränderlichen Input (Eingabe) wie Spracherkennung erweisen sich Netze, die Schleifen enthalten, als extrem nützlich. Die Schleifen verbinden die innen liegenden Neuronenschichten wieder mit der Eingabe, so dass die Berechnungen nicht nur starr von vorn nach hinten verlaufen. Zudem gibt es »tiefe« neuronale Netze, die Dutzende oder gar Hunderte versteckter Schichten enthalten. Sie bestehen somit aus Tausenden Neuronen mit Millionen Verbindungen zwischen ihnen, wodurch man schnell den Überblick verliert. Besonders gut eignen sie sich bei Problemen, die selbst keinen festen Regeln folgen, wie es bei der Mustererkennung der Fall ist.

Der entscheidende Punkt bei allen neuronalen Netzen ist, dass die Verbindungen zwischen den Neuronen zunächst nicht fixiert sind, sondern sich mit der Zeit anpassen. Möchte man etwa einem Programm beibringen, Hunde von Katzen zu unterscheiden, übergibt man ihm Bilder beider Arten und lässt es die Bezeichnung erraten. Das Ergebnis wird nicht besser ausfallen als bei einem Münzwurf, also fifty-fifty. Wenn das Netzwerk falschliegt, verändert es die Stärke der Verbindungen, die zu dem fehlerhaften Resultat beigetragen haben. Dann wiederholt man den Vorgang immer und immer wieder. Nach zirka 10000 Beispielbildern schneidet das Programm in etwa so gut ab wie ein Mensch.

Bemerkenswert ist, dass das Netzwerk dabei auch lernt, Bilder zu sortieren, die es nie zuvor gesehen hat. Informatiker verstehen immer noch nicht ganz, wie es das genau macht.

Überempfindliche Computer

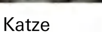
Beim maschinellen Lernen muss man aufpassen, dass ein Computer die Daten nicht zu ernst nimmt. Soll eine KI etwa Hunde- (rot) und Katzenbilder (blau) voneinander unterscheiden, wird sie die Beispieldaten nach selbst gewählten Parametern einteilen. Die beiden Kurven stehen dann für zwei mögliche Modelle, um Katzen und Hunde zu differenzieren. Das grüne Modell folgt den Daten gut, doch es ist extrem kompliziert und hängt stark von den gewählten Beispielen ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Algorithmus einen neuen Datenpunkt falsch einordnet, ist daher hoch. Dieses Phänomen wird als Überanpassung (»overfitting«) bezeichnet. Die schwarze Kurve entspricht dagegen einem sinnvollen Modell, selbst wenn es ein paar Daten falsch zuordnet.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Falscher Fokus





Katze



Avocadocreme

ANISH ATHALYE; NICHOLAS CARLINI UND DAVID WAGNER; MIT FRDL. GEN. VON ANISH ATHALYE, MIT

Falls sich eine KI auf falsche Merkmale stützt, kann das fatale Folgen haben. Ein Beispiel dafür, das glücklicherweise glimpflich ausging, ereignete sich in den 1990er Jahren: Eine Forschungsgruppe der Carnegie Mellon University in Pennsylvania versuchte damals, einen Algorithmus zu entwickeln, der ein Auto steuern kann.

Sie trainierte ihr Programm, indem sie lange Autofahrten unternahm und alles filmte, was sie dabei tat. Um ihren Algorithmus zu testen, setzten sich einige der beteiligten Wissenschaftler in ein Fahrzeug, das die KI steuerte. Zu Beginn schien alles wunderbar zu funktionieren. Doch als sie eine Brücke erreichten, geriet das Auto ins Schlingern, und einer der Forscher musste ins Lenkrad greifen, um einen Unfall zu verhindern.

Wie sich nach wochenlangen Untersuchungen herausstellte, waren die Straßen bei allen Probefahrten von Gras umgeben gewesen. Der Algorithmus hatte deshalb fälschlicherweise angenommen, dass man nur dort fahren darf, wo an der Seite Gras wächst. Bei der Brücke wusste die KI nicht mehr, was sie tun sollte.

Dieser Fokus auf irreführende Details macht Algorithmen angreifbar. Hat man etwa ein Programm darauf trainiert, verschiedene Motive auf Bildern zu identifizieren, kann man es recht einfach austricksen: Fügt man einem Bild gezielt ein extrem schwaches Rauschmuster hinzu (wobei die Pixel ihren Wert nur so leicht ändern, dass es für das menschliche Auge nicht sichtbar ist – wie oben rechts), wird die KI etwa statt einer Katze mit 99-prozentiger Sicherheit plötzlich Avocadocreme erkennen.

An diesen Problemen arbeiten Forscher derzeit auf Hochtouren. Denn gerade Bilderkennungssoftware kann in etlichen Bereichen sinnvoll verwendet werden, zum Beispiel um in medizinischen Scans Anomalien zu identifizieren. Damit man ihrem Urteil vertrauen kann, müssen die Systeme jedoch zuverlässig funktionieren.

Es ist meist sehr schwierig, die Kriterien zu ermitteln, nach denen ein solcher Algorithmus seine Entscheidung fällt. Doch in einem sind sich die Forscher inzwischen einig: Es ist wichtig, einem Programm während des Trainings kleinere Fehler durchgehen zu lassen (siehe »Überempfindliche Computer«, links). Sonst hängen die Ergebnisse zu stark von den konkreten Beispieldaten ab, anstatt sich auf die wesentlichen Merkmale der gezeigten Objekte zu stützen. Die Algorithmen könnten ihre Urteile dann auf untypische Eigenschaften stützen, was verheerende Folgen haben kann (siehe »Falscher Fokus«, oben).

Neuronale Netze wären allerdings nicht besonders nützlich, wenn sie bloß Aufgaben erledigen könnten, deren auch Menschen Herr werden. Weil die Netzwerke ihre Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen aber selbst formen, sind sie in der Lage, Probleme zu meistern, für die Menschen noch keine Lösung gefunden haben – etwa, wie man neuronale Netze weiter verbessert. Wissenschaftler haben nun damit begonnen, KIs auf eine ihrer größten Schwächen anzusetzen: die riesigen Datenmengen, die sie benötigen, um neue Aufgaben zu bewältigen.

Dabei sollen neuronale Netze lernen, wie ein neuronales Netz lernt. Das klingt zunächst kompliziert, doch im Prinzip ist es nichts anderes, als würde man einem Programm beibringen, Bilder zu erkennen: Man muss es mit vielen Beispielen füttern. In diesem Fall zeigt man ihm aber keine Bilder, sondern ein anderes Netzwerk, das etwas Neues lernt. Das Verfahren nennen Computerwissenschaftler Metalernen. Es verleiht Computern mehr Flexibilität. »Diese Methode wird wahrscheinlich der Schlüssel zu einer neuartigen KI sein, die mit der menschlichen Intelligenz konkurriert«, meint Jane Wang, Forscherin bei DeepMind in London. Im Umkehrschluss glaubt sie, dass Neurowissenschaftler durch Metalernen besser verstehen könnten, was im menschlichen Gehirn passiert.

Das Lernen lernen

Die Idee des Metalernens ist nicht neu. In den 1980er Jahren nutzten Computerwissenschaftler die Evolution als Vorbild, um ihre Software für das Lernen zu optimieren. Schließlich ist der evolutionäre Prozess unter anderem ein Metalernen-Algorithmus: Die verschiedenen Tierarten haben in der Natur Lernfähigkeit entwickelt, statt sich bloß auf ihre Instinkte zu verlassen. Die Evolution ist allerdings vom Zufall getrieben, so dass daran angelehnte Algorithmen häufig in Sackgassen münden und daher nicht wirklich effizient sind. In den frühen 2000er Jahren entwickelten Forscher deshalb andere Ansätze für das Metalernen, wodurch die Programme wesentlich schneller wurden.

Chelsea Finn von der University of California in Berkeley und ihr Team schafften 2017 einen Durchbruch auf dem Gebiet des Metalernens. Indem sie ein neuronales Netz immer wieder vor neue Aufgaben stellen, können sie die optimale Startkonfiguration des Programms berechnen. In dieser Konfiguration lernt es eine neue Aufgabe dann an Hand von bloß wenigen Beispielen zu bewältigen, anstatt dafür zehntausende Daten zu benötigen.

Angenommen, man möchte einem neuronalen Netz beibringen, Bilder in eine von fünf Kategorien einzuteilen, wie Hunde- und Katzenrassen, Automarken, Hutfarben oder Ähnliches. Beim gewöhnlichen maschinellen Lernen (ohne »Meta«) füttert man das Programm zuerst mit Tausenden von Hundebildern und optimiert die Verbindungen im Netzwerk so lange, bis es die Bilder richtig sortiert. Würde man wollen, dass dieses Netzwerk hingegen Katzenbilder kategorisiert, müsste man von vorn anfangen und alles überschreiben, was es über Hunde gelernt hat.

Beim Metalernen geht man einen anderen Weg. Man versucht die Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen so einzustellen, dass das Netzwerk nur wenige Beispiele braucht, um Dinge in fünf Kategorien einzuteilen.

Dazu benötigen die Forscher zwei neuronale Netze: einen übergeordneten Metalerner und einen gewöhnlichen Lerner. Im ersten Schritt zeigen sie dem Lerner fünf Hundebilder, eines von jeder Rasse. Danach übergeben sie ihm ein Testbild, das er einer der fünf Rassen zuordnet – nach bloß fünf Beispielen wird das nicht sehr gut gelingen. Dennoch wird das Lerner-Netzwerk versuchen, die Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen so zu verändern, dass es beim nächsten Mal besser klappt. Diese neue Konfiguration liest der Metalerner aus.

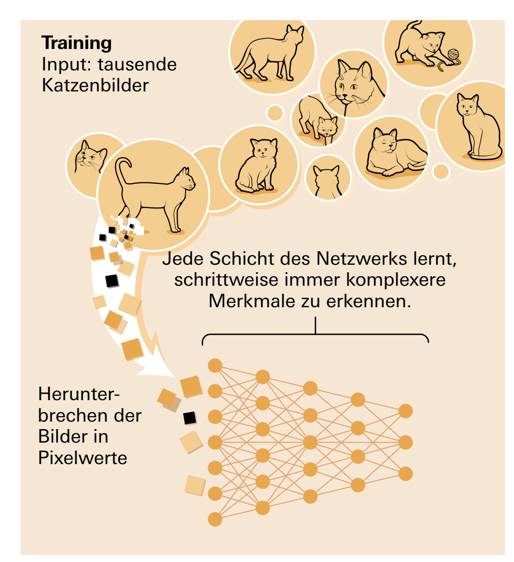
Im zweiten Schritt löschen die Wissenschaftler das bescheidene Wissen, welches das Lerner-Netzwerk über Hunde erworben hat, und wechseln zu Katzen: Sie zeigen dem Lerner ein Beispiel jeder Rasse, füttern ihn wieder mit jeweils einem Testbild und übergeben dann die optimierte Konfiguration des Netzwerks an den Metalerner. Das Ganze wiederholt man für Autos, Hüte und so weiter. Der Metalerner ermittelt danach, welche Anfangskonfiguration des Lerners am besten geeignet ist, um verschiedene Objekte in fünf Kategorien einzuteilen. Zeigt man einem solchen optimierten Programm schließlich fünf Vogelarten, wird es schneller lernen, Vogelbilder einzuordnen, als mit einer zufälligen Anfangskonfiguration.

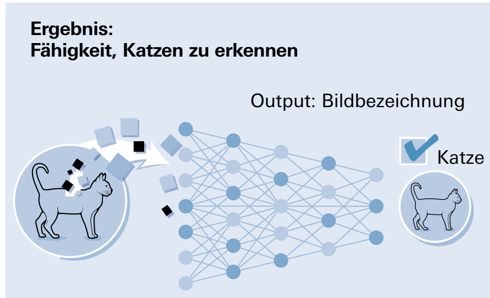
Das Besondere an dieser Methode ist, dass die Netzwerke dabei nicht darauf trainiert werden, eine bestimmte Aufgabe zu meistern. Stattdessen konzentrieren sie sich auf die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Probleme. Im Beispiel zuvor haben sich die Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen des Netzwerks so eingestellt, dass dieses für Eingangsdaten in Form eines Bilds extrem gut geeignet ist. »Wenn ein Algorithmus darauf vorbereitet ist, Formen, Farben und Texturen von Objekten herauszufiltern, dann kann es ein neues Objekt ziemlich schnell erkennen«, erklärt Chelsea Finn.

Inzwischen hat die Forscherin zusammen mit ihren Kollegen das Metalernen ins Labor gebracht: Sie konfrontierten einen Roboter mit verschiedenen Aufgaben, die alle damit zu tun hatten, möglichst schnell zu einer bestimmten

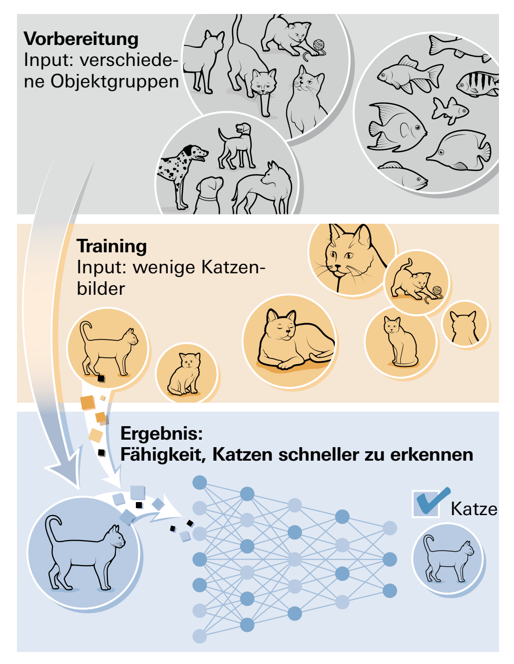
Neuronale Netze

Um Bilder zu klassifizieren, verarbeitet ein Netzwerk die eingegebenen Pixel in mehreren Stufen und gibt am Schluss ein Ergebnis aus, etwa eine Bezeichnung des Bildinhalts. Dieser Prozess erfordert in der Regel ein Training mit Tausenden von Beispielbildern. Wie genau das Programm zu seinen Resultaten kommt, geht meist im Gewirr der Verknüpfungen innerhalb des Netzwerks verloren.





Metalernen
Um die Menge der Trainingsdaten zu reduzieren, bereiten Forscher die Netzwerke auf ihre Aufgabe vor, indem sie ihnen ähnliche Probleme vorsetzen. Dadurch wird der optimale Anfangszustand des neuronalen Netzes gesucht, durch den es am schnellsten eine gewisse Art von Aufgabe lernt.



BROWN BIRD DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2019

Stelle zu gelangen. Nach dem Prozess des Metalernens erkannte der Roboter, dass er bei jeder Aufgabe rennen musste. Danach stellte sich ihm bloß noch die Frage, in welche Richtung er losflitzen sollte. Um sich bestmöglich auf einen Befehl vorzubereiten, rannte der Roboter daher an Ort und Stelle. »Das macht es für ihn einfacher, vorwärts oder rückwärts loszusprinten«, sagt Finn.

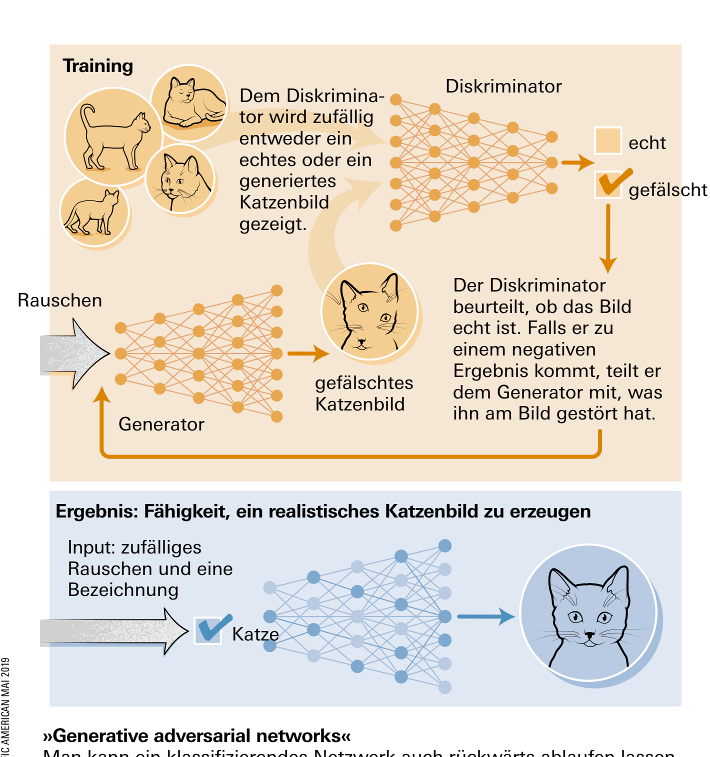
Die neue Methode scheint also in der wirklichen Welt zu funktionieren. Dennoch birgt sie auch Nachteile: Man braucht zwar nur wenige Daten, um einem bereits optimierten Algorithmus eine bestimmte Fertigkeit beizubringen, trotzdem sind insgesamt enorme Datenmengen für den Metalerner nötig, der das Lerner-Netzwerk trainiert. Zudem ist der Ansatz extrem rechenintensiv, weil die Algorithmen die teilweise sehr feinen Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufgaben erkennen müssen. »Selbst wenn neuronale Netze in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht haben, sind sie noch weit davon entfernt, wie Menschen zu lernen«, erklärt der Kognitionswissenschaftler Brenden Lake von der New York University.

Gegnerische Netzwerke

Metalernen ist nicht der einzige Ansatz, bei dem Forscher neuronale Netze nutzen, um diese selbst zu verbessern. Tatsächlich kann ein Algorithmus ein Netzwerk darauf trainieren, zwei durch und durch menschliche Züge zu entwickeln: Kreativität und Fantasie (siehe **Spektrum** Mai 2019, S. 68). Das zeigte sich in einer Flut von Porträtfotos, die in den letzten Jahren das Internet überschwemmten. Das Überraschende an ihnen ist: Die abgebildeten Menschen haben niemals existiert. Sie sind das Produkt einer neuen Technologie mit einer ausgeklügelten Art von Fantasie.

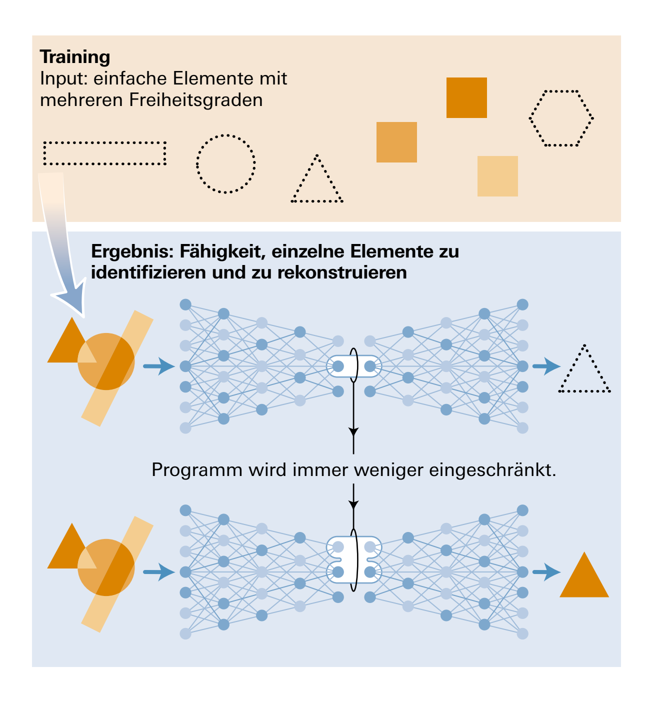
Überraschenderweise lässt sich die menschliche Vorstellungskraft nämlich recht einfach automatisieren. Dazu muss man bloß ein gewöhnliches Bilderkennungsprogramm, ein so genanntes diskriminierendes neuronales Netz, rückwärtslaufen lassen. Dadurch wird es zu einem »generativen« Netzwerk, das Bilder erzeugt. Während man einem Diskriminator Bilder übergibt, die er daraufhin benennt oder beschreibt, funktioniert ein Generator genau andersherum: Aus einer Bezeichnung kreiert er eigenständig Bilder. Der Vorgang ist allerdings recht aufwändig. Immerhin muss man irgendwie sicherstellen, dass das Netzwerk ein sinnvolles Ergebnis produziert. Übergibt man ihm beispielsweise den Begriff »Dobermann«, dann sollte es erkennbar einen solchen Hund zeichnen. Doch wie trainiert man einen Generator darauf, derartige Aufgaben zu erfüllen?

Als sich Ian J. Goodfellow, heute bei Google Brain in Mountain View, Kalifornien, während seiner Doktorarbeit mit dieser Frage beschäftigte, kam ihm 2014 die Idee, generative Netzwerke durch einen Diskriminator zu trainieren. Wenn man daher das Bild eines Dobermanns erzeugen



»Generative adversarial networks«
Man kann ein klassifizierendes Netzwerk auch rückwärts ablaufen lassen, so dass es beispielsweise realistische Bilder von Katzen erzeugt, die niemals existiert haben. Wissenschaftler trainieren diese »generativen Netzwerke« durch gewöhnliche Klassifizierer (so genannte Diskriminatoren), die bewerten, wie wirklichkeitsnah die KI-Bilder sind. Zusätzlich fügen sie dem System zufälliges Rauschen hinzu, um sicherzustellen, dass jede Katze einzigartig ist.

Netzwerke im Tandem
Um einem Programm beizubringen, die Objekte einer Szene zu identifizieren, braucht man zwei Netzwerke. Das eine (im blauen Bild links) komprimiert die übergebenen Daten, während das andere (rechts) sie wieder dekomprimiert. Je weniger man die Daten komprimiert, desto präziser wird die Beschreibung des Bilds.



BROWN BIRD DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2019

möchte, zeigt man einem Diskriminator entsprechende Fotos und mischt eines darunter, das der Generator erstellt hat. Der Diskriminator prüft daraufhin, ob das generierte Bild »echt« ist. Wird es abgelehnt, muss sich der Generator verbessern. »Es ist wie eine Art Spiel zwischen ihnen«, erklärt Goodfellow. »Das eine Netzwerk erzeugt Bilder, während das andere errät, ob sie echt oder gefälscht sind.« Diese Technik wird als »generative adversarial network« (GAN) bezeichnet.

Zu Beginn des Prozesses ist der Generator noch in einem zufälligen Anfangszustand, in dem er keine klaren Bilder produziert. Zu dem Zeitpunkt hat auch der Diskriminator bloß wenige Trainingsdaten erhalten, so dass er nicht allzu streng ist. Während das diskriminierende Netzwerk immer besser lernt, wie echte Bilder aussehen, muss sich der Generator ebenfalls steigern. Mit etwas Glück gelingt es ihm irgendwann, ein so realistisches Bild zu produzieren, dass er den Diskriminator täuscht.

So viel versprechend der Ansatz auch klingt, er führt leider nicht immer zum Erfolg. Die Netzwerke bleiben oft in einer Sackgasse stecken. Der Generator produziert dann beispielsweise dauerhaft unrealistische Bilder, oder der Diskriminator erfasst nicht die wesentlichen Merkmale der Trainingsdaten. Das Gelingen hängt stark vom Anfangszustand der neuronalen Netze ab, ohne dass man allerdings genau weiß, wie. »Wir haben keine wissenschaftliche Erklärung dafür, warum manche Modelle besonders gut und andere wiederum extrem schlecht abschneiden«, sagt Goodfellow.

Intelligente Bildbearbeitung

Dennoch hat kaum eine andere Methode so schnell derart viele Anwendungen gefunden wie die GANs. Von der Analyse kosmologischer Daten über Teilchenkollisionen bis hin zur Konstruktion von Zahnkronen: Wann immer man Daten braucht, die einem zuvor eingegebenen Datensatz ähneln, kann man auf GANs zurückgreifen. Die Programme erkennen dabei Muster, die dem menschlichen Auge zum Teil entgehen.

Eine bemerkenswerte Anwendung ist »Pix2Pix«, das Bilder auf jede nur erdenkliche Weise bearbeiten kann. Dabei übertrifft es gewöhnliche Grafikprogramme wie Photoshop um Längen. Zwar können diese ein Farbbild auf Graustufen oder auf einfache Linienzeichnungen reduzieren, andersherum versagen sie aber. Denn das Einfärben eines Bilds erfordert kreative Entscheidungen. Pix2Pix kann genau das. Dazu muss man dem Algorithmus zuerst Farbbilder mit den dazugehörigen Strichzeichnungen übergeben. Zeigt man dem Programm dann eine solche Zeichnung, kann es sie realistisch einfärben, selbst wenn es das Bild nie zuvor gesehen hat.

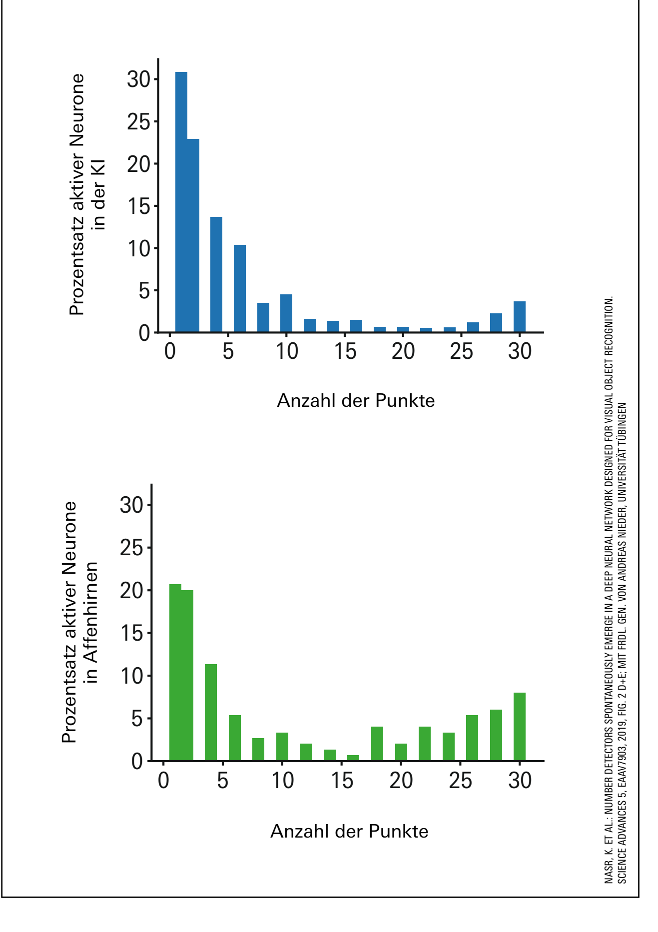
Neben GANs gibt es auch noch andere Möglichkeiten, neuronale Netze miteinander zu verbinden. Nicholas Guttenberg und Olaf Witkowski, beide am Earth-Life Science Institute in Tokio, ließen 2017 zwei Netzwerke kooperieren, anstatt sie gegeneinander antreten zu lassen. Die Forscher zeigten den Programmen jeweils unterschiedliche Ausschnitte von Bildern verschiedener Stilrichtungen. Um das Genre der jeweiligen Bilder zu bestimmen,

Computer mit Zahlenverständnis

Schon lange wissen Biologen, dass nicht nur Menschen, sondern auch viele Tiere über ein Zahlenverständnis verfügen: Sie können abschätzen, ob zwei Mengen gleich groß sind, und beurteilen, welche davon mehr Elemente enthält.

Nun haben Wissenschaftler der Universität Tübingen ähnliche Versuche mit einem neuronalen Netz durchgeführt, das sie eigentlich darauf trainiert hatten, verschiedene Objekte in Bildern zu erkennen. Als sie die KI danach diverse Punktmuster mit bis zu 30 Punkten vergleichen ließen, schnitt die Maschine dabei in etwa so gut ab wie Menschen oder auch Affen: In 81 Prozent der Fälle konnte sie richtig einschätzen, welches Bild mehr Punkte enthält – und das, obwohl sie niemals auf so eine Aufgabe trainiert wurde.

Genau wie echte Lebewesen tat sich die KI schwer damit, wenn zwei Muster aus ähnlich vielen oder sehr vielen Punkten bestanden. Und auch die künstlichen Neurone reagierten erstaunlicherweise ähnlich auf die gezeigten Muster, wie es die Nervenzellen im Gehirn von Affen tun: Je nach Anzahl der Punkte auf einem Bild werden unterschiedliche Neurone aktiv, wobei mehr Neurone kleinen Zahlen zugeordnet sind als großen.



NASR, K. ET AL.: NUMBER DETECTORS SPONTANEOUSLY EMERGE IN A DEEP NEURAL NETWORK DESIGNED FOR VISUAL OBJECT RECOGNITION. SCIENCE ADVANCES 5, EAAV7903, 2019, FIG. 2 D+E; MIT FRDL. GEN. VON ANDREAS NIEDER, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

waren die Algorithmen daher gezwungen, zusammenzuarbeiten. Doch dafür mussten sie sich untereinander austauschen.

Programme, die sich das Kommunizieren selbst beibringen, eröffnen völlig neue Anwendungsmöglichkeiten. »Unsere Hoffnung ist, dass eine Gruppe von Netzwerken eine gemeinsame Sprache entwickelt, um sich ihre jeweiligen Fähigkeiten gegenseitig beizubringen«, erklärt Guttenberg. Sollten KIs irgendwann wirklich so weit sein, dann könnten sie sich eventuell auch Menschen gegenüber auf verständliche Weise erklären, hoffen die Wissenschaftler.

Bis es so weit ist, wird allerdings noch viel Zeit vergehen. Momentan mühen sich Forscher mit viel grundlegenderen Problemen ab. Denn selbst wenn KIs in vielen Fällen extrem gut darin sind, Bilder zu klassifizieren, unterlaufen ihnen manchmal immer noch peinliche Fehler: So kann es vorkommen, dass ein Programm einen Straußenvogel mit einem Schulbus verwechselt. Die Muster, die KIs erkennen, haben häufig nichts mit den physischen Elementen einer Szene zu tun. »Den Maschinen fehlt ein Objektverständnis, das selbst Tiere wie Ratten besitzen«, meint Irina Higgins, eine KI-Forscherin bei DeepMind.

Damit neuronale Netze ihre Umgebung wirklich verstehen, müsste jede ihrer Variablen einem Freiheitsgrad der untersuchten Welt entsprechen, äußerte Yoshua Bengio von der Université de Montréal 2009. Wenn es beispielsweise um die Analyse von Filmen geht, sollte eine Variable stets die Position eines Objekts im Bild symbolisieren. Bewegt sich bloß das Objekt, dann ändert sich nur diese Variable – auch wenn sich dabei Hunderte oder Tausende von Pixeln verschieben.

Sieben Jahre nach Bengios Idee gelang es Higgins und ihren Kollegen endlich, sie umzusetzen. Dafür nutzten sie die Tatsache, dass Bilder lauter überschüssige Informationen enthalten, die sich aus relativ wenigen Variablen erzeugen lassen. »Die Welt steckt voller Redundanzen – genau diese komprimiert und verwertet unser Gehirn«, erklärt Higgins. Damit sich auch die Algorithmen auf die wichtigsten Faktoren eines Bilds konzentrieren, schränkt die Forscherin sozusagen deren »Sichtfeld« ein. Die Wissenschaftler setzen dazu zwei Netzwerke ein: Eines komprimiert die Eingangsdaten, das andere dekomprimiert sie wieder. Dadurch filtert das Programm die wesentlichen Informationen einer Szene heraus. Nach und nach heben die Forscher dann die Einschränkungen auf, wodurch die Algorithmen immer mehr Details miteinbeziehen.

Um die Methode zu testen, erzeugten Higgins und ihr Team eine einfache »Welt«, die bloß aus Herzen, Quadraten und Ovalen auf einem zweidimensionalen Gitter besteht. Jede dieser Formen kann in sechs Größen vorkommen und um einen von 20 möglichen Winkeln verkippt sein. Die Informatiker präsentierten einem neuronalen Netz alle Versionen einer solchen Welt. Das Programm sollte daraufhin die fünf Freiheitsgrade identifizieren: Position entlang der beiden Achsen, Form, Orientierung und Größe der Objekte. Das Netzwerk erkannte die Position als wichtigsten Faktor – die anderen Variablen lassen sich danach einfacher auf die Strukturen anwenden. Schritt für Schritt spürte das Programm dann auch die anderen Freiheitsgrade auf.

Das ist ein bedeutender Schritt in Richtung einer KI, die ihre Umgebung versteht. Dennoch liegt das Ziel noch in weiter Ferne. Immerhin kannten die Forscher die Regeln ihrer künstlich geschaffenen Welt schon im Voraus und konnten daher das Ergebnis des Programms genau überprüfen. Bei komplexen Problemen aus dem wirklichen Leben überblicken selbst Menschen nicht immer die gesamte Situation. Da aber eine Person die Leistung eines solchen Algorithmus beurteilen muss, hängen die Ergebnisse auch stark von dieser subjektiven Einschätzung ab.

Maschinelle Argumentation

Trotzdem eröffnet Higgins' Ansatz viel versprechende Anwendungen. Der Hauptgrund dafür ist, dass KIs so nachvollziehbarer werden: Man kann ihrer Argumentation direkt folgen – schließlich ähnelt sie menschlichen Schlussfolgerungen.

Außerdem lassen sich durch Higgins' Methode Netzwerke entwickeln, die neue Aufgaben bewältigen, ohne ihr zuvor gesammeltes Wissen zu vergessen. Angenommen, man zeigt einem Programm Hundebilder, die es nach Rassen sortieren soll. Das Netzwerk wird das Hauptaugenmerk auf spezifische Merkmale der jeweiligen Rasse legen. Übergibt man ihm plötzlich Katzenbilder, wird es die Änderung bemerken. »Wir können tatsächlich sehen, wie die Neurone reagieren. Ihr atypisches Verhalten deutet darauf hin, dass die KI etwas über einen neuen Datensatz lernt«, erklärt Higgins. Wenn das passiert, könnte man dem Programm beibringen, zusätzliche Neurone zu erzeugen. Dadurch würde es neue Informationen speichern, ohne altes Wissen zu überschreiben.

Die aktuellen Fortschritte auf dem Gebiet des maschinellen Lernens verleihen Computern immer mehr menschliche Talente (siehe »Computer mit Zahlenverständnis«, links). Die Zukunft wird zeigen, ob die neuen Ansätze wirklich irgendwann zu Programmen führen werden, deren Intelligenz mit der menschlichen vergleichbar ist – oder ob Kritiker Recht behalten und völlig neue Methoden hermüssen, um den Bereich wirklich voranzutreiben. So oder so: Es bleibt spannend. ◂

QUELLEN

Finn, C. et al.: Model-agnostic meta-learning for fast application of deep newtorks. ArXiv 1703.03400, 2017

Goodfellow, I. et al.: Generative adversarial networks. ArXiv 1406.2661, 2014

Higgings, I. et al.: β-VAE: Learning basic visual concepts with a constrained variational framework. International conference on learning representations 5, 2017

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
DIE LANGE JAGD NACH DEN VERBORGENEN METALLEN

Sie sind weich wie Butter und reagieren explosionsartig, wenn man sie mit Wasser beträufelt: Die Alkalimetalle verhalten sich ganz anders als sonstige Metalle, denen wir täglich begegnen. Ihrer Entdeckung haben sie sich lange widersetzt.




Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

spektrum.de/artikel/1654768

Als der russische Chemiker Dmitri Mendelejew (1834–1907) und zeitgleich sein deutscher Kollege Lothar Meyer (1830–1895) die damals bekannten Elemente nach Masse sowie wiederkehrenden Eigenschaften sortierten und das Periodensystem erschufen, ordneten sie Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium und Cäsium zusammen in eine Gruppe ein. Diese Alkalimetalle, zu denen außerdem das 1939 entdeckte Francium gehört, bilden heute gemeinsam mit Wasserstoff die erste Hauptgruppe des Periodensystems. Zuvor hatten sie Wissenschaftlern allerdings lange Zeit Rätsel aufgegeben.

Natriumchlorid (NaCl) als berühmteste Alkalimetallverbindung kennt jeder unter der Bezeichnung Kochsalz. Es wurde schon in grauer Vorzeit zum Würzen von Speisen verwendet. Soda (Natriumkarbonat, Na_2CO_3) benutzten die alten Ägypter zum Waschen und Reinigen, die Griechen und Römer verwendeten dazu Pottasche (Kaliumkarbonat, K_2CO_3). Beide Stoffe wurden durch die Verbrennung von Seetang und Küstenpflanzen gewonnen. Man verarbeitete sie aber nicht nur zu Seife, sondern nutzte sie auch bei der Glasherstellung. Eine weitere Alkalimetallverbindung, die der Chemiker und Apotheker Johann Rudolph Glauber im Jahr 1625 in Mineralwasser entdeckte, leistet auch heute noch gute Dienste: Das so genannte Glaubersalz (Natriumsulfat-Decahydrat, $Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$) wird als Abführmittel in der Medizin verwendet.

Im 18. Jahrhundert begannen Wissenschaftler, die chemische Zusammensetzung von Soda und Pottasche aufzuklären. Der französische Chemiker Duhamel du Monceau (1700–1782) zeigte, dass man Soda sowohl aus Kochsalz als auch aus Glaubersalz herstellen kann. Daraus folgerte er, dass diese Verbindungen eine gemeinsame »Basis« haben müssen. Andreas Sigismund Marggraf (1709–1782) schaffte es mit Hilfe von Experimenten erstmals, zwischen Soda und Pottasche zu unterscheiden: Bringt man Soda in die nicht leuchtende Flamme eines Bunsenbrenners, färbt sie diese intensiv gelb – Pottasche hingegen violett. Die »Basis« der Stoffe musste somit voneinander verschieden sein.

Dieses Experiment kann man sehr leicht mit der so genannten Flammprobe nachvollziehen, einer Methode zur Analyse von chemischen Elementen. Sie beruht darauf, dass die Atome beziehungsweise Ionen in einer farblosen Flamme Licht spezifischer Wellenlängen abgeben, das für jedes Element charakteristisch ist. Klassisch befeuchtet man ein ausgeglühtes Magnesiastäbchen mit etwas verdünnter Salzsäure, taucht es in das zu untersuchende Salz und hält es schließlich in die Bunsenbrennerflamme. Spektakulärer wird dieses Experiment, wenn man jeweils eine Portion Soda und Pottasche in einem kleinen Gefäß, zum Beispiel in der Lade einer Streichholzschachtel, auf der Heizung trocknet. Danach werden die beiden Stoffe zerrieben und in je ein kleines verschließbares Gläschen gefüllt. Der Bunsenbrenner wird entzündet und die Luftzufuhr maximal geöffnet, so dass eine nicht leuchtende Flamme entsteht. Nun schüttelt man das Gläschen mit der Sodaportion kurz und hält es an die geöffnete Luftzufuhr des Bunsenbrenners. Die Flamme färbt sich augenblicklich gelb, da Sodastäube mit eingesogen werden. Pottasche hingegen färbt die Flamme violett. Auch die Salze der



MATTHIAS DUCCI

Alkalimetallsalze zeigen in der an sich nicht leuchtenden Flamme eines Bunsenbrenners charakteristische Flammenfärbungen (von links nach rechts: Lithium-, Natrium- und Kaliumkarbonat).

anderen Alkalimetalle zeigen charakteristische Flammenfärbungen: Lithiumverbindungen ergeben eine karminrote Farbe, Rubidiumsalze leuchten rotviolett und Verbindungen des Cäsiums blauviolett.

Im 18. Jahrhundert stellten die Menschen zwei weitere Alkalimetallverbindungen her, indem sie Soda und Pottasche mit gebranntem Kalk (Kalziumoxid, CaO) und Wasser behandelten: Ätznatron und Ätzkali. Diese Stoffe kennen wir heute als Natrium- beziehungsweise Kaliumhydroxid. Weil sie in Wasser stark alkalische und damit ätzende Lösungen ergeben, bezeichnete man den Herstellungsprozess auch als Kaustifizierung (= ätzend machen, von griechisch »kaustikos« = ätzend und lateinisch »facere« = machen). Chemisch läuft dabei folgende Reaktion ab (»M« steht hierbei für Natrium oder Kalium, die Symbole »s«, »l« und »aq« bedeuten »fest«, »flüssig« sowie »in Wasser gelöst«):

$$M_2CO_3(s) + CaO(s) + H_2O(l) \rightarrow 2\ MOH(aq) + CaCO_3(s)$$

Natrium- beziehungsweise Kaliumkarbonat + Kalziumoxid + Wasser → Natrium- beziehungsweise Kaliumhydroxid + Kalziumkarbonat

Eine bedeutende Erfindung im Jahr 1799 sollte bei der Suche nach der Basis von Alkalimetallverbindungen entscheidend weiterhelfen.

1780 bemerkte Luigi Aloisio Galvani (1737–1798), dass sich die Muskeln in Froschschenkeln zusammenzogen, wenn diese mit miteinander verbundenen Kupfer- und Eisennadeln in Berührung kamen. Ausgehend von diesen Versuchen entwickelte der italienische Aristokrat und Physiker Alessandro Volta (1745–1827) einfache elektrochemische Zellen, indem er zwei verschiedene Metalle in eine elektrisch leitfähige Lösung tauchte. Derartige Batterien waren jedoch nicht besonders leistungsfähig. Erst als er zahlreiche Zink- und Kupferplatten übereinanderstapelte, erreichte er wesentlich stärkere elektrische Ströme. Zwischen jedes Paar sich berührender Zink- und Kupferplatten legte er eine mit verdünnter Schwefelsäure getränkte Lederscheibe. Diese Anordnung, die später den Namen Voltasche Säule erhielt, stellte er im Jahr 1800 der Royal Society vor, einer 1660 gegründeten britischen Gelehrtengesellschaft zur Wissenschaftspflege. Noch im selben Jahr machte er die ersten Elektrolyseversuche. Dabei lässt man elektrischen Strom mit Hilfe zweier Elektroden durch eine leitfähige Flüssigkeit, beispielsweise eine Salzlösung fließen. Im System läuft eine Redoxreaktion ab – ein Stoff wird reduziert, während ein anderer oxidiert wird.

Der englische Chemiker Humphry Davy (1778–1829) führte zwischen 1805 und 1806 zahlreiche derartige Versuche durch. So elektrolysierte er unter anderem wässrige Lösungen von Zinksulfat ($ZnSO_4$) und Natriumsulfat (Na_2SO_4). Davy nutzte hierzu zwei Platinelektroden, als kostengünstigere Alternative empfehlen sich heute Kohleelektroden. Er beobachtete, dass sich am Minuspol eine graue Schicht von Zink abscheidet, da die positiv geladenen Zinkionen in der Lösung zum Minuspol wandern und dort mit je zwei Elektronen Zinkatome bilden:

$$\text{Minuspol: } Zn^{2+}(aq) + 2\ e^- \rightarrow Zn(s)$$

Zinkion + Elektronen → Zinkatom


MATTHIAS DUCCI

In einer Porzellanschale wird geschmolzenes Natriumhydroxid elektrolysiert. Dabei entsteht Sauerstoff als Gas am Pluspol (links), am Minuspol bildet sich elementares Natrium in Form metallisch-glänzender Kügelchen (rechts).

Am Pluspol entsteht Sauerstoff (das Symbol »g« steht für »gasförmig«):

Pluspol: $2\ H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 4\ H^+(aq) + 4\ e^-$

Wassermoleküle → Sauerstoffmolekül + Wasserstoffionen + Elektronen

Davy schrieb dazu: »Nimmt man Metallauflösungen, so bilden sich auf dem negativen Platindraht metallische Krystallisationen oder Niederschläge (…) und man findet bald in dem positiven Becher eine bedeutende Menge von Säure.« Da er bei der Elektrolyse mit zwei Gefäßen arbeitete, meinte er mit dem »positiven Becher« die Lösung, in die der Pluspol tauchte. Die saure Lösung entsteht, weil sich neben Sauerstoff auch Wasserstoffionen bilden, die den sauren Charakter einer Lösung verursachen.

Als Davy eine Natriumsulfatlösung elektrolysierte, hoffte er, dass sich ein noch unbekanntes Metall am Minuspol abscheiden würde und er so die immer noch unbekannte »Basis« des Salzes finden könnte. Zu seiner Enttäuschung entwickelten sich an beiden Elektroden jedoch nur Gase: Am Pluspol entstand Sauerstoff, und die Lösung wurde sauer, am Minuspol bildete sich Wasserstoff, und die Lösung wurde alkalisch:

Minuspol: $2\ H_2O(l) + 2\ e^- \rightarrow H_2(g) + 2\ OH^-(aq)$

Wassermoleküle + Elektronen → Wasserstoffmolekül + Hydroxidionen

Obwohl Davy sein Ziel nicht erreicht hatte, war er – wie fast alle Chemiker seiner Zeit – davon überzeugt, dass Soda, Pottasche, Ätznatron, Ätzkali sowie andere ähnliche Verbindungen bis dato unbekannte Metalle enthalten mussten. Doch trotz des Einsatzes Voltascher Säulen mit 150 Plattenpaaren und einer Spannung von 120 Volt gelang es niemandem, diese herzustellen. Stattdessen zersetzte sich lediglich Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff. Doch dann hatte Davy die entscheidende Idee: Er verzichtete auf das Wasser und elektrolysierte die Alkalisalze in geschmolzenem Zustand. Diesen Versuch können erfahrene Experimentatoren mit den entsprechenden Schutzvorkehrungen (geschlossener Abzug, Schutzbrille, Schutzkittel) nachstellen. Hierzu füllt man eine Porzellanschale etwa einen Zentimeter hoch mit frischem, möglichst wasserfreiem Natriumhydroxid. Zwei mit einer Gleichspannungsquelle verbundene Kupferelektroden ragen so weit wie möglich in die Schale hinein, dürfen sich aber nicht berühren. Man erhitzt die Schale mit dem Bunsenbrenner, bis das Natriumhydroxid vollständig geschmolzen ist. Nun wird die Spannungsquelle eingeschaltet und auf 10 bis 15 Volt eingeregelt. Die Schmelze braust auf, und es ist eine lebhafte Gasentwicklung (Sauerstoff) am Pluspol zu beobachten. Am Minuspol entstehen kleine, metallisch-glänzende Kügelchen, die sich teilweise entzünden.

Davy schrieb über seine Beobachtungen: »(…) ich entdeckte aber kleine Kügelchen, die einen sehr lebhaften Metallglanz hatten und völlig wie Quecksilber aussahen. Einige verbrannten in dem Augenblick, in welchem sie


MATTHIAS DUCCI

Mit einem Küchenmesser angeschnittene Natriumstange mit »Rinde« aus Natriumhydroxid.

gebildet wurden, mit Explosion und lebhafter Flamme; andere blieben bestehen, liefen aber an und bedeckten sich zuletzt mit einer weißen Rinde, die sich an ihrer Oberfläche bildete.« Der Chemiker soll bei seinen Entdeckungen derart begeistert gewesen sein, dass er seine Arbeit erst nach einer Pause fortsetzen konnte.

Bei dieser so genannten Schmelzflusselektrolyse laufen die folgenden Prozesse ab:

Minuspol: $Na^+(l) + e^- \rightarrow Na(l)$

Natriumion + Elektron → Natriumatom

Pluspol: $4\ OH^-(l) \rightarrow 2\ H_2O(l) + O_2(g) + 4\ e^-$

Hydroxidionen → Wassermoleküle + Sauerstoffmolekül + Elektronen

Mit Ätzkali erhielt Davy ähnliche Ergebnisse. Er nannte die beiden neuen Metalle Sodium und Potassium, abgeleitet von Soda und Pottasche. Jöns Jakob Berzelius (1779–1848) gab ihnen die deutschen Bezeichnungen Natrium und Kalium und ordnete ihnen die chemischen Symbole Na und K zu. Die anderen Alkalimetalle wurden erst Jahrzehnte später entdeckt und in Reinform dargestellt.

Davy wie auch andere Chemiker seiner Zeit machten sich nach der Isolierung der neuen Elemente gleich daran, ihre Eigenschaften zu untersuchen: Sie sind so weich, dass sie mit einem normalen Messer durchgeschnitten und portioniert werden können. Da sie schon an der Luft rasch anlaufen und eine Hydroxidschicht bilden, hatte er die Idee, sie in einer Flüssigkeit aufzubewahren. Hierzu eignet sich Paraffinöl, in dem auch heute noch Alkalimetalle gelagert werden. Mit Wasser dagegen reagieren sie heftig; dabei bildet sich Wasserstoff, der sich mitunter entzündet, sowie eine alkalische Lösung. Bei Kalium verläuft dieser Prozess sogar explosionsartig. Chemisch formuliert erhält man:

$2\ Na(s) + 2\ H_2O(l) \rightarrow 2\ Na^+(aq) + H_2 + 2\ OH^-(aq)$

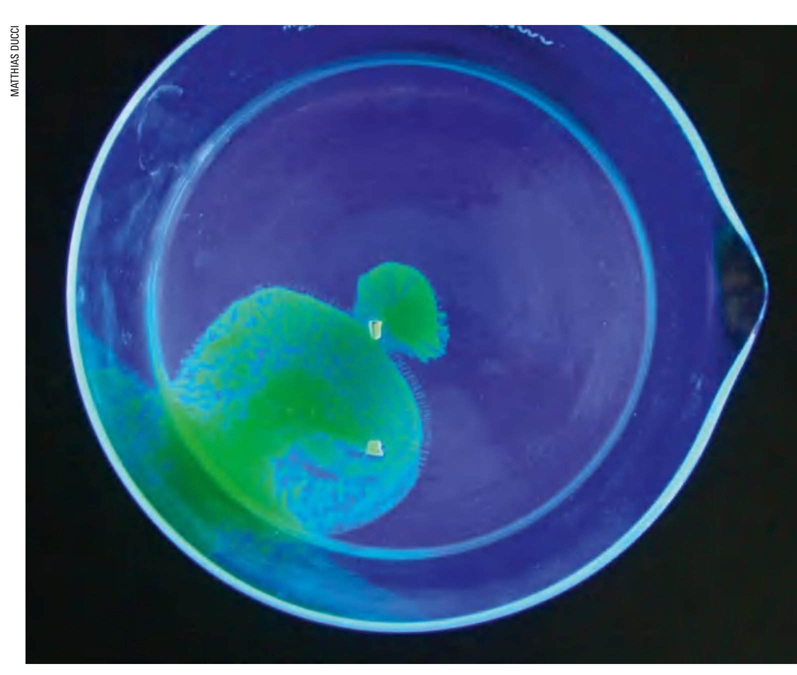
Natriumatome + Wassermoleküle → Natriumionen + Wasserstoffmolekül + Hydroxidionen

Beim Experimentieren fallen beim »Entrinden« des angelaufenen Metalls zahlreiche kleine Schnipsel an, die elementares Natrium enthalten und entsorgt werden müssen. Dazu gibt man sie in Ethanol, wo sie entsprechend der folgenden Gleichung vergleichsweise gemächlich miteinander reagieren:

$2\ Na(s) + 2\ C_2H_5OH(l) \rightarrow 2\ Na^+ + 2\ C_2H_5O^- + H_2(g)$

Natriumatome + Ethanolmoleküle → Natriumionen + Ethanolat-Ionen + Wasserstoffmolekül

Dieses (Entsorgungs-)Experiment ist wesentlich eindrucksvoller, wenn man zuvor den Fluoreszenzfarbstoff Pyranin in Ethanol löst. Unter UV-Licht (mit einer Wellenlänge von 365 Nanometern) fluoresziert Pyranin in Ethanol intensiv blau. Gibt man Natriumreste in diese Lösung, so dass die oben beschriebene Reaktion einsetzt, ändert sich die Fluoreszenz spektakulär von blau nach grün. Dies liegt daran, dass die entstehenden Ethanolat-Ionen jeweils ein Proton aus den Farbstoffmolekülen abspalten. Dadurch ändern sich die Fluoreszenzeigenschaften des Pyranins.



MATTHIAS DUCCI

Beim Entsorgen von Natriumschnipseln in einer ethanolischen Pyranin-Lösung ändert sich die Fluoreszenz unter UV-Licht (Wellenlänge 365 nm) von blau zu grün.

Ethanolat-Ion + Pyranin → Ethanol-Molekül + Pyranin (deprotoniert)

Pyranin (links) fluoresziert unter UV-Licht blau, während seine deprotonierte Form (rechts) dann grün leuchtet.

Alkalimetallverbindungen dienen heute unter anderem zur Energieerzeugung sowie -speicherung (etwa in Lithium-Ionen-Akkumulatoren), zu medizinischen Zwecken (beispielsweise Lithiumzitrat in der Neurologie) und als Additive in Betonbauten (Lithiumverbindungen). Man findet sie in Feuerwerkskörpern (beispielsweise Kaliumchlorat), als Gewürz auf dem Frühstücksei (Natriumchlorid) und im Düngemittel (darunter Natrium- und Kaliumsalze) für das Getreide, aus dem unser Frühstücksbrötchen entsteht. ◂

QUELLEN

Davy, H.: Electrochemische Untersuchungen. In: W. Ostwald (Hg.): Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 45, 1893

Jansen, W. et al.: Die Entdeckung der Alkalimetalle Natrium und Kalium. Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 4, 1991

Stalke, D.: Alkalimetalle – reaktive Alleskönner. Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 3, 2014

KELTEN

KRIEGER MIT GOLDSCHMUCK

Griechischen und römischen Geschichtsschreibern galten die Kelten als Barbaren. Doch kunstfertige und mitunter beeindruckend filigrane Goldschmiedearbeiten werfen ein anderes Licht auf die gefürchteten Krieger.




Die Archäologin und gelernte Goldschmiedin **Barbara Armbruster** erforscht am französischen Centre national de la recherche scientifique die theoretischen und praktischen Aspekte prähistorischen Goldschmiedehandwerks. Der Archäometallurge **Roland Schwab** leitet das Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim und untersucht Metallartefakte mit naturwissenschaftlichen Verfahren.

spektrum.de/artikel/1654770

SERIE

Gold und Macht

Teil 1: August 2019
Krieger mit Goldschmuck
Barbara Armbruster und Roland Schwab

Teil 2: September 2019
Die Herren der Ringe
Mai Lin Tjoa-Bonatz

Teil 3: Oktober 2019
Die Schätze der Wikinger
Heidemarie Eilbracht und Antje Wendt


BARBARA ARMBRUSTER / MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE SAARBRÜCKEN

Die lebensgroße Statue aus Sandstein (links) ist wohl das Abbild eines Fürsten, der im 5. Jahrhundert v. Chr. in einem monumentalen Grabhügel am Glauberg (Hessen) bestattet wurde. Die Skulptur zeigt ihn mit Halsreif, Arm- und Fingerring als Teil seines herrschaftlichen Ornats. Tatsächlich entdeckten Archäologen unter den Grabbeigaben solchen Schmuck (oben).

»Zur Geradheit und Leidenschaft der Gallier aber gesellen sich Torheit, Prahlerei und Putzsucht. Denn sie tragen viel Gold, um den Hals nämlich Ketten, um die Arme und Handgelenke Armringe, und die Vornehmen tragen bunt gefärbte und goldbestickte Kleider.« So beschrieb der antike Geschichtsschreiber Strabon gegen Ende des 1. Jahrhunderts v. Chr. in seinem Werk »Geographica« die Eliten der keltischen Kultur (siehe »Kurz erklärt: Die Kelten«, S. 75).

Als Julius Cäsar zwischen 58 und 50 v. Chr. Gallien eroberte, beschrieb er die dort ansässigen Stämme in seinem berühmten Werk »De bello Gallico« zwar gleichfalls als ungehobelte und streitsüchtige Barbaren, gleichwohl zollte ihnen der Feldherr Respekt. Nackt sollen die Krieger in die Schlacht gezogen sein, da sie weder Wunden noch Tod scheuten. Die Anführer habe man an ihren »torques« erkannt (lateinisch für »das Gedrehte«): offenen, teilweise kordelartig gewundenen Halsreifen aus Gold (siehe Bild oben).

Tatsächlich kam in Prunkgräbern in Südwestdeutschland, Ostfrankreich und Teilen der Schweiz üppiger Goldschmuck aus der ersten Phase der keltischen Kultur zum Vorschein, der Hallsteinzeit. Wegen der reichen Beigaben und der Nähe zu großen Siedlungen nannte man diese Grabanlagen bald Fürstengräber. Archäologen entdeckten darin oft auch vierrädrige Wagen, Trinkgeschirr aus Kera-

AUF EINEN BLICK
FILIGRANE KUNSTWERKE

1 So furchtlos seien die Kelten, berichten antike Autoren, dass sie sich nackt in die Schlacht stürzten, ihre Anführer mit goldenen Halsringen angetan.

2 In der Tat spielte das Edelmetall seit der Frühzeit dieser Kultur im 8. Jahrhundert v. Chr. eine große Rolle, wie »Fürstengräber« zeigen. Später opferten die Kelten es auch Göttern und prägten daraus Münzen.

3 Ihre Goldschmiede waren wahre Meister, die mit diversen Techniken aufwändige Formen und Ornamente fertigten, in denen sich Keltisches mit Stilelementen mediterraner Hochkulturen vermischte.

mik, Bronze oder Eisen sowie aus der Mittelmeerwelt importierte Luxusgüter aus Koralle oder Elfenbein. Meistens war solcher Prunk Männern vorbehalten, seltene Ausnahmen jener Zeit sind der in den 1950er Jahren entdeckte Grabhügel der Fürstin von Vix in Burgund, deren Torques mediterrane Einflüsse zeigt (siehe Bild S. 77), und das 2010 im Gräberfeld Bettelbühl in den Donauauen geborgene Grab zweier Frauen, alle aus dem 6. Jahrhundert v. Chr.

Grabbeigaben aus Edelmetallen umfassten neben persönlichem Schmuck und Kleiderbesatz zudem Gefäße und goldverzierte Waffen. Torques gehörten damals ebenfalls oft dazu, seltener goldene Gewandspangen, Nadeln oder Schalen. All dieser Schmuck diente wohl vor allem der Präsentation von Rang und gesellschaftlicher Zugehörigkeit. Das gilt sicherlich vor allem für solche Gegenstände, die schon zu Lebzeiten getragen wurden. Doch weisen manche keine Gebrauchsspuren auf, waren also wohl eigens für den Totenkult gefertigt worden. Möglicherweise sollten sie den Verstorbenen helfen, ihren Status im Jenseits zu behaupten.

Goldfunde vom Beginn der sich im 5. Jahrhundert v. Chr. anschließenden Latènezeit stammen noch vorwiegend aus Fürstengräbern. Fast monumental mutet ein Standbild an, das sich auf dem Grabhügel vom Glauberg erhob und einen Keltenkrieger mit Torques, Arm- und Fingerring zeigt. Genau diesen Schmuck trug der Krieger in Gold gefertigt auch im Grab (siehe Bilder S. 72 und 73).

In den Grabstätten fand man mit Masken, Tierbildern und Ornamenten verzierte Hals-, Arm- und Fingerringe, die Männern und Frauen offenbar gleichermaßen als Machtinsignien dienten. Eine der Letzten, die solche Beigaben erhielten, war die in der zweiten Hälfte des 4. Jahrhunderts v. Chr. verstorbene Fürstin von Waldalgesheim, deren Hals- und Armschmuck mit rankenartigen Verzierungen einmal mehr wohl an mediterrane Vorbilder anknüpfte.

Aus späterer Zeit kamen goldene Kostbarkeiten vor allem in so genannten Horten zum Vorschein, die man unter anderem in Tempelanlagen oder Naturheiligtümern deponiert hatte. Dabei erschließt sich nicht immer, ob diese Niederlegungen »Wertdepots« waren oder einem religiösen Zweck dienten. Ihre regelhafte Verbreitung spricht allerdings für einen kultischen Opfercharakter.

Ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. begannen die Kelten eigene Münzen zu prägen, nachdem sie das Prinzip der Geldwirtschaft von Griechen und Römern übernommen hatten. In zahlreichen Goldhorten, etwa bei Niederzier, St. Louis (Frankreich) und Beringen (Belgien), entdeckten Forscher neben Ringschmuck auch Geldstücke, die man auf Grund ihrer Form und einer Legende nach als »Regenbogenschüsselchen« bezeichnet (siehe Bild unten). Die Bedeutung des Edelmetalls erweiterte sich also vom Zeichen der Mächtigen hin zu einem fast schon profanen, freilich sehr wertvollen Zahlungsmittel.

Der Spur des Goldes folgen

Anscheinend wuchsen die umlaufenden Goldmengen im Lauf der Zeit an: Während die rund 550 bekannten hallstattzeitlichen Objekte aus Gold oder Silber zusammen etwa 6,3 Kilogramm auf die Waage bringen, kommen die gut 450 Regenbogenschüsselchen aus dem latènezeitlichen Münzschatz von Manching allein schon auf fast vier Kilo-



BARBARA ARMBRUSTER / MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE SAARBRÜCKEN

In der jüngeren Eisenzeit horteten die Kelten zunehmend ihr Gold – oft in Form so genannter Regenbogenschüsselchen (rechts im Bild). Diese typisch keltischen Münzen tragen ihren Namen auf Grund der Form und einer Volkssage: Sie seien von Regenbogen heruntergetropft und hätten sich an deren Enden gesammelt. Bis heute lebt der Mythos, dass sich dort Töpfe von Gold finden ließen, vor allem in den keltischen Volksmärchen Irlands.

Kurz erklärt: Die Kelten

Laut antiken Autoren wie Strabon, Herodot und Hekataios von Milet siedelten die »keltoi« um 600 v. Chr. zwischen den Quellen des Istros (Donau) und der griechischen Koloniestadt Massilia (heute Marseille). Archäologisch lassen sie sich in dieser ersten Kulturphase, der nach einem österreichischen Fundort benannten **Hallstattzeit** (zirka 800–450 v. Chr.), sogar vom Nordosten Frankreichs bis ins nördliche Kroatien, von den Alpen bis zu den deutschen Mittelgebirgen nachweisen. Ihr Siedlungsgebiet vergrößerte sich während der **Latènezeit** (etwa 450 v. Chr. – um Christi Geburt), benannt nach dem Fundort La Tène am Neuenburgersee in der Schweiz. Um neues Land für eine wachsende Bevölkerung zu finden, verließen einige Stämme an der Wende vom 5. zum 4. Jahrhundert v. Chr. ihre ursprünglichen Siedlungsgebiete nördlich der Alpen. Sie stießen bis nach Rom vor, plünderten das Umland, belagerten und brandschatzen die Tiberstadt. Zeitweise erstreckte sich der keltische Kulturraum von Spanien bis in die Türkei, von Italien bis auf die Britischen Inseln.

Nach heutigem Verständnis handelte es sich um Stammesverbände mit jeweils unterschiedlichen keltischen Sprachen, doch mit ähnlichen religiösen Vorstellungen und gesellschaftlichen Strukturen. Zudem gilt die Verarbeitung von Eisen als eine Kernkompetenz aller Kelten. Weit über die Stammesgebiete hinaus waren ihre Produkte gefragt. Das brachte die Eliten in Kontakt mit den damaligen Hochkulturen Griechenlands, ebenso mit italischen Volksstämmen wie den Etruskern und später den Römern.

gramm. Für die Horte von Irsching oder Gaggers, die Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt wurden, dokumentierte das Königliche Münzcabinet in München damals sogar doppelt bis dreimal so viele Geldstücke; leider wurden sie anschließend verkauft oder eingeschmolzen.

Woher aber hatten die Kelten das viele Gold? Dem griechischen Gelehrten Poseidonios (135–51 v. Chr.) zufolge wuschen sie es aus dem Sand und Geröll von Flüssen. Naturwissenschaftliche Analysen konnten zeigen, dass Goldobjekte der Hallstattzeit und der frühen Latènezeit, das heißt bis in das 3. Jahrhundert v. Chr., tatsächlich häufig das typische Elementmuster so genannter Flussseifen aufweisen. Dieses Gold wird durch Verwitterungsprozesse aus den primären Goldlagerstätten freigesetzt und vom Regen in Gewässer gespült, wo es mit anderen Mineralen in Bereiche geringer Strömungsgeschwindigkeit absinkt und »Seifen« genannte Lagerstätten bildet. Ab dem 5. Jahrhundert v. Chr. begann man aber auch schon mit dem Abbau von Berggold, etwa im französischen Massif central und in den belgischen Ardennen.

BARBARA ARMBRUSTER / MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE SAARBRÜCKEN

Schriftquellen zufolge erreichte Gold zudem in Form von Staub, Barren oder Fertigprodukten als Importware den keltischen Kulturraum. Um dabei keinem Betrug aufzusitzen, wurden die Chargen auf ihre Reinheit getestet. Dazu dienten feinkörnige, dunkle Kieselsteine: Mit dem zu beurteilenden Gegenstand zeichnete man einen Strich auf solche Steine. Der charakteristische Farbton dieses Abriebs verriet dem erfahrenen Prüfer die Qualität des Metalls.

Zu den natürlichen Beimengungen von Seifen- und Berggold gehören auch Anteile von Silber. Mitunter wurde das Material geläutert, also das Silber abgetrennt, da es einen helleren Glanz verleiht, der nicht immer erwünscht war. Dazu bedurfte es der so genannten Zementation: In einer chemischen Reaktion mit Kochsalz wird das Silber in Silberchlorid überführt, während das Gold davon unberührt bleibt. Die Reaktion findet in einem Tongefäß statt, das neben dem Kochsalz noch zerkleinerte, angefeuchtete Keramik enthält, die das pulvrige Silberchlorid aufsaugt, so dass das Gold als poröse Masse zurückbleibt.

Archäologisch ist die Methode erstmals für Sardis in der heutigen Türkei belegt. Dort soll der legendäre König Krösus bereits Mitte des 6. Jahrhunderts v. Chr. eine Goldraffination betrieben haben, um Münzen mit einem standardisierten, hohen Feingehalt zu prägen. Tatsächlich weisen griechische Goldstücke ab dieser Zeit einen sehr hohen

Reinheitsgrad auf. Einige gelangten wohl durch den Seehandel in die keltische Welt, vor allem über die Hafenstadt Massilia, das heutige Marseille; andere wahrscheinlich im Gepäck keltischer Söldner. Insbesondere die Münzen der im heutigen Böhmen siedelnden Boier bestanden aus hochreinem Gold. Im Dienst mediterraner Herrscher könnten Krieger entsprechenden Lohn erhalten haben. Zurück in ihrer Heimat, ließen sie die fremden Münzen dann in die einheimische Währung umprägen.

Die ältesten keltischen Artefakte aus geläutertem Gold stammen aus dem 5. Jahrhundert v. Chr., blieben aber nach derzeitigem Forschungsstand die Ausnahme. Denn je höher der Feingehalt, desto weicher das Metall. Je nach Anwendungszweck haben die Schmiede der Goldschmelze deshalb Silber oder Kupfer zugegeben.

Die Forscher spüren der Herkunft des Edelmetalls und den einzelnen Schritten bei seiner Weiterverarbeitung inzwischen mit naturwissenschaftlichen Analyseverfahren nach. Mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (siehe »Kurz erklärt: Spektroskopie des Goldes«, unten) bestimmen sie die Hauptbestandteile der Artefakte und erkennen auf diese Weise Legierungen, deren geografische Verbreitung sie untersuchen. Das Verfahren sieht aber nur die oberflächliche Zusammensetzung der Objekte, und gerade die kann beispielsweise durch die Korrosion von Kupfer und Silber chemisch verändert sein. Die Methode liefert daher oft nur Näherungswerte. Eine gute Alternative ist die massenspektrometrische Analyse, mit der sich selbst Spurenelemente mit Konzentrationen von teilweise weniger als einem Milligramm pro Kilogramm identifizieren lassen.

Zweifellos bezeugen die goldenen Schmuck- und Prestigeobjekte ein hervorragendes Knowhow in der Metallurgie und eine außergewöhnliche Kunstfertigkeit. Die Bearbeitung des hochwertigen Materials war sicherlich nur wenigen vorbehalten, ebenso das geheime Wissen um Zeichen und Symbole. Konkrete schriftliche Informationen oder bildliche Darstellungen von Goldschmieden bei der Arbeit, wie wir sie etwa aus dem alten Ägypten kennen, sind aus der keltischen Kultur leider nicht überliefert. Ebenso fehlen archäologische Funde entsprechender Goldschmiedeateliers. Um die Bearbeitungstechniken zu rekonstruieren, studieren Archäologen daher vor allem die Spuren, die Werkzeuge auf Objektoberflächen hinterlassen haben.

Demnach verfügten die Handwerker über Schmelztiegel und Gussformen, die sie aus Ton oder aus Stein herstellten. Mit Hämmern, Ambossen, Meißeln, Punzen (Schlagstempel), Pinzetten und Zangen aus Bronze, Eisen, Knochen, Hirschgeweih oder Holz formten und verzierten sie die Roherzeugnisse, wie experimentell arbeitende Archäologen zeigen konnten. Um Kanten und Oberflächen zu glätten, nutzten sie vermutlich Schleifsteine, feinen Sand, Asche und Zinnkraut. Metallmenge und Qualität kontrollierte man mit Waagen, Gewichten und den erwähnten Prüfsteinen.

Für Vorprodukte wie Barren verwendeten die Goldschmiede das einfache Herdgussverfahren mit einer offenen Gussform. Für komplexere Stücke arbeiteten sie mit dem anspruchsvolleren »Guss in verlorener Form«, bei dem zunächst ein Modell aus Wachs gefertigt wurde, das sie mit Ton ummantelten. Nach dem Trocknen der Gussform wurde das Wachs ausgeschmolzen und der verbliebene Hohlraum mit Goldschmelze gefüllt.

Komplexe Formen dank Goldlot

Die Handwerker verwendeten zudem Goldbleche, um hohle und somit leichtere Objekte herzustellen, was enorm viel Material sparte. Mit Punzen formten sie Reliefs und geometrische Muster in die Bleche. All diese Verfahren des Gießens und plastischen Verformens waren bereits den bronzezeitlichen Goldschmieden bekannt. In Mitteleuropa wurde während der Hallstattzeit aber erstmals das Löten angewandt. Dabei verband man mehrere Einzelteile wie goldene Bleche, Drähte und Stäbe zu komplexeren Objekten. Dazu diente Goldlot, eine Legierung aus Gold mit einem höheren Anteil an Kupfer, die bei geringeren Temperaturen schmilzt als die zu verbindenden Komponenten. Stücke oder Späne davon legte der Schmied an die passende Stelle und erhitzte das Werkstück beispielsweise in einem Holzkohlefeuer. Dank dieser Technik ließ sich eine große Palette an komplexen Formen und Verzierungen erzeugen. In der Latènezeit hat man dann selbst kleine Fingerringe oder Haarschmuck aus vielen Kleinteilen durch Löten aufgebaut.

Das Meisterstück aber ist der aus 66 Elementen bestehende hohle Torques aus dem Grab der keltischen Fürstin

Kurz erklärt: Spektroskopie des Goldes

Aus welchen Elementen und chemischen Verbindungen ein Stoff besteht, ist eine Grundfrage für jede Materialcharakterisierung.

Bei der zerstörungsfreien **Röntgenfluoreszenzanalyse** werden Atome durch energiereiche Röntgenstrahlen angeregt, die ihrerseits eine charakteristische Fluoreszenzstrahlung im Röntgenbereich aussenden. Das Spektrum dieser Fluoreszenz verrät Experten, welche Elemente in einer Probe vertreten sind. Nur in geringen Mengen vorkommende Konzentrationen kann man mit dieser Methode allerdings nicht messen.

Für eine solche Spurenelementanalyse mussten den Artefakten bis vor einigen Jahren größere Proben entnommen werden. Dieses Problem löst die **Laser-Ablations-Technik**, bei der ein hochenergetischer Lichtstrahl winzige Probenmengen von der Oberfläche verdampft.

In einem **Massenspektrometer** lassen sich die verschiedenen Elemente nach ihren Atommassen auftrennen. Die verdampften Partikel werden ionisiert und in einem elektrischen Feld beschleunigt. Je nach Analysesystem werden die verschiedenen Isotope auf unterschiedliche Weise entsprechend dem Verhältnis von ihrer Masse zu ihrer elektrischen Ladung getrennt.





Um 500 v. Chr. beherrschte die Fürstin von Vix einen der reichsten Handelsplätze der Kelten, den Mont Lassois an der Seine. Mit Griechen und italischen Stämmen stand sie wohl in regem Austausch, wie ihre Grabbeigaben nahelegen. Auch in ihrem imposanten Halsreif spiegeln sich Einflüsse aus der mediterranen Kultur. Hergestellt wurde er aber höchstwahrscheinlich von keltischen Goldschmieden (rechtes Bild: Detailvergrößerung).

BARBARA ARMBRUSTER / MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE SAARBRÜCKEN

von Vix in Burgund (um 500 v. Chr., siehe Bild oben). Seine Enden zieren stilisierte Mohnkapseln, die selbst aus mehreren Einzelteilen bestehen. Darüber sitzt auf jeder Seite eine naturalistisch gestaltete Löwenpranke; ein dahinter angeordnetes geflügeltes Pferd scheint gerade zum Sprung anzusetzen. Beide Motive verweisen auf kulturelle Einflüsse aus dem Mittelmeerraum. Das filigrane Podest, auf dem der kleine Pegasus steht, besteht aus zahlreichen Rund- und Perldrähten. Diese dünnen Metalldrähte derart präzise aufzulöten, verlangte eine überaus genaue Materialkenntnis und große Erfahrung bei der Temperatursteuerung. Denn beim kleinsten Fehler drohten solch feine Verzierungen zu schmelzen – die Arbeit wäre ruiniert gewesen.

Anders als die offenen Torques beeindrucken die älteren geschlossenen Arm- und Halsringe durch ihre perfekte Symmetrie in der Form und den geometrischen Mustern, wie sie im berühmten Fürstengrab von Hochdorf aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. vorkommen. Mikroskopische Spuren und Experimente, bei denen man diese Schmuckformen immer wieder nachzubilden versuchte, zeigen: Die Ringe wurden auf einer Drückbank gefertigt, indem ein Goldblechzylinder über einen Holzmodel mit dem gewünschten Relief geschoben wurde, der an einer Drehachse befestigt war. Während diese rotierte, presste man den Zylinder an das Holz und arbeitete das Relief mit entsprechenden Werkzeugen ein. Überreste einer solchen Vorrichtung wurden bislang aber noch nicht gefunden.

Bei den späteren, latènezeitlichen Goldarbeiten finden sich diese Zier- und Herstellungstechniken immer seltener. Hier bestimmen vor allem figürliche und sehr plastisch gestaltete Ornamente das Bild, die entweder gegossen oder in Blech ziseliert sind, wobei das Relief mit Punzen heraus modelliert oder – jedoch seltener – mit Pressmodeln erzielt wurde.

Vordergründig erzählen die Goldobjekte der Kelten eine Geschichte von Luxus und Macht. Ihre interdisziplinäre Erforschung, die archäologische, herstellungstechnische und materialanalytische Aspekte verknüpft, erlaubt aber auch spannende Einblicke in die Entwicklung von Kunst, Handwerk und Technologie. Bereits früh standen die keltischen Eliten in einem intensiven Austausch mit den Griechen, ließen sich von deren Repräsentationskultur und Kunsthandwerk inspirieren. Diese Weltgewandtheit zeigt sich besonders deutlich, wenn mediterrane Ornamente und einheimische Symbolik auf den Goldobjekten eine eigene Mischung eingingen. Dabei bewiesen keltische Schmiede und Kunsthandwerker ein erstaunliches Geschick und stellten Goldschmiedearbeiten auf hohem künstlerischem und technologischem Niveau her. ◂

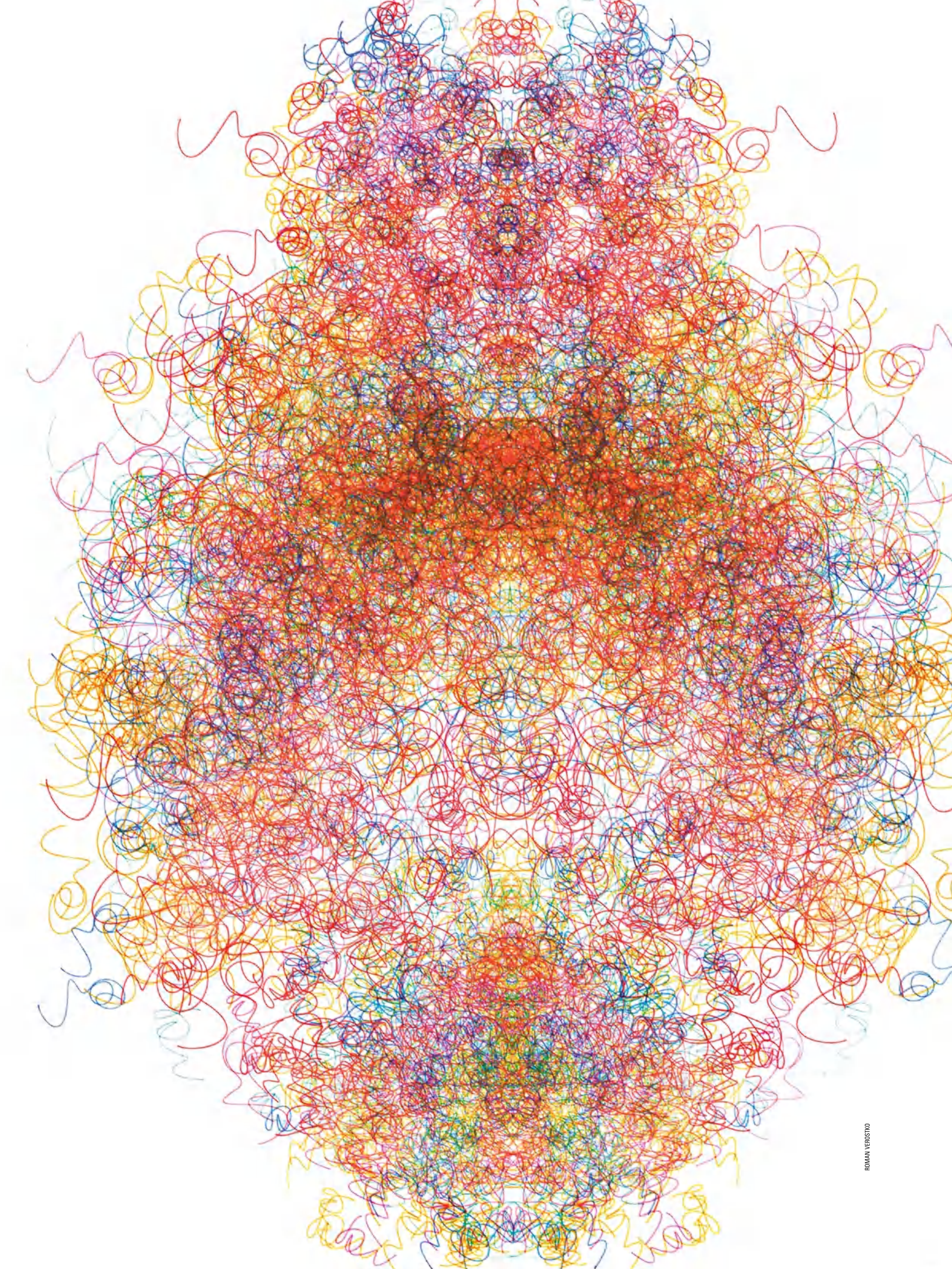
QUELLEN

Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg (Hg.): Die Welt der Kelten. Zentren der Macht – Kostbarkeiten der Kunst. Jan Thorbecke, 2012

Hansen, L.: Hochdorf VIII: Die Goldfunde und Trachtbeigaben des späthallstattzeitlichen Fürstengrabes von Eberdingen-Hochdorf (Kr. Ludwigsburg). Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 118. Theiss, 2010

Rolley, C. (Hg.): La tombe princière de Vix. Picard, 2003

Schwab, R. et al. (Hg.): Early Iron Age gold in celtic Europe. Society, technology and archaeometry. Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft 6,1. Marie Leidorf, 2018



ROMAN VEROSTKO

ÄSTHETIK
MATHEMATISCHE KUNST

Aus der Mathematik inspirierte Bilder und Skulpturen entfalten ihre atemberaubende Schönheit.



Stephen Ornes ist Wissenschaftsjournalist in Nashville, Tennessee, und schreibt unter anderem für »Scientific American« und »New Scientist«.

⏩ spektrum.de/artikel/1654772

Manchester Illuminated Turing Machine, #23 (1998)

Der US-Amerikaner Roman Verostko machte in den 1940er Jahren eine Kunstausbildung, wurde Priester, verließ diesen Beruf wieder, heiratete, zerlegte Computer und lernte in BASIC zu programmieren. Er ist einer der Ersten, der seine Werke mit selbst entwickelter Software erzeugte, und zählt daher zu den Pionieren der »algorithmischen Kunst«.

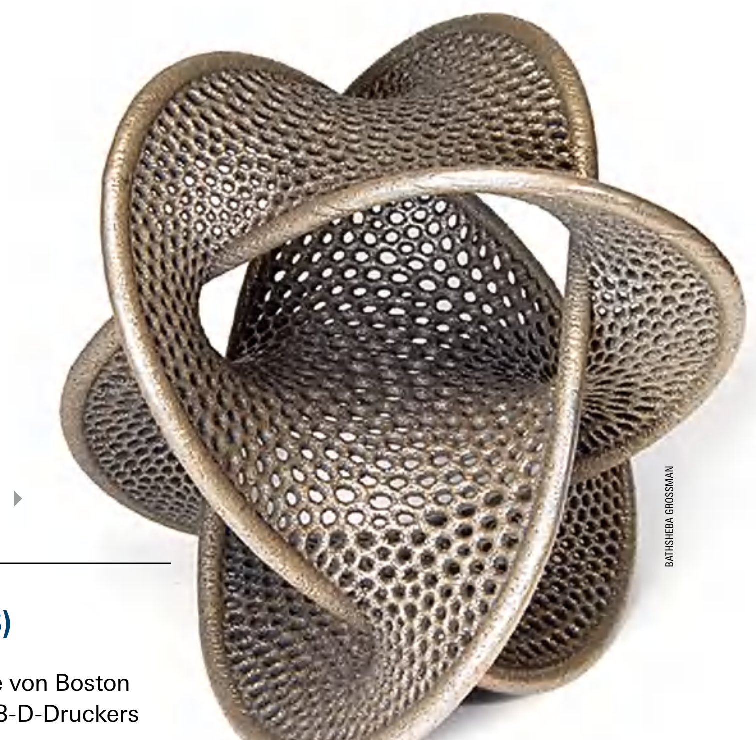
Als Verostko 1998 das Buch »The Emperor's New Mind« des berühmten Physikers Roger Penrose las, ließ ihn ein darin beschriebener Aspekt nicht mehr los. Penrose definiert in seinem Werk eine universelle Version der nach dem britischen Wissenschaftler Alan Turing benannten Maschinen, die die Arbeitsweise eines Computers modellieren. Ihre universelle Version sollte Penrose zufolge jede Funktion einer spezialisierten Turing-Maschine nachahmen können. Demnach kann eine universelle Turing-Maschine (UTM) alles berechnen, was berechenbar ist. Dieses Konzept begeisterte Verostko außerordentlich.

Daher entschied er, dass die UTM eine prachtvolle Aufmachung verdient. Wegen seiner theologischen Studien orientierte er sich dabei an handschriftlichen mittelalterlichen Texten, die aufwändig mit goldenen und silbernen Illustrationen verziert sind. Mit einem Plotterstift schuf Verostko die abstrakten Figuren, mit denen er die binäre Definition der UTM – eine lange Folge aus Nullen und Einsen – geschmückt hat.

ROMAN VEROSTKO

Vielen Menschen haucht Mathematik Ehrfurcht ein. Ihre starren Regeln und Prinzipien lassen nur wenig Spielraum für Interpretationen. So wird es beispielsweise immer unendlich viele Primzahlen geben, genauso wie die Ziffern der Kreiszahl Pi niemals enden.

Andererseits ist es diese Beständigkeit, welche die Mathematik für viele so attraktiv macht. Ein Beweis oder eine Gleichung kann ausgesprochen elegant wirken. Gerade der Bereich der Gruppentheorie, der unter anderem Drehungen und Spiegelungen von Objekten beschreibt, ist dabei besonders reizvoll. Denn die Transformationen lassen sich oft durch Symmetrien visualisieren, wie man sie etwa in den ästhetischen Mustern von Schneeflocken erkennt.



BATHSHEBA GROSSMAN

Borromean Rings Seifert Surface (2008)

Seit mehr als einem Jahrzehnt schmiedet die in der Nähe von Boston lebende Künstlerin Bathsheba Grossman mit Hilfe eines 3-D-Druckers mathematische Skulpturen aus Metall.

Die drei Außenringe ihres Werks berühren sich zwar nicht, sind aber trotzdem untrennbar miteinander verbunden. Entfernt man einen Ring, lösen sich auch die zwei anderen voneinander. Diese berühmten Borromäischen Ringe zieren das Logo der Internationalen Mathematischen Union. Für Mathematiker, die im Bereich der Knotentheorie arbeiten, sind solche Gebilde besonders interessant.

Die durch die Borromäischen Ringe begrenzte Oberfläche heißt Seifert-Oberfläche. Um ihre seltsame Form hervorzuheben, hat Grossman eine perforierte Textur gewählt, die durch ein abwechslungsreiches Licht- und Schattenspiel ihre ungewöhnliche Topografie betont.



CARLO H. SÉQUIN

Aurora Australis (2010)

Der Informatiker Carlo H. Séquin von der University of California in Berkeley ist durch hunderte Werke bekannt, die abstraktesten geometrischen Konzepten eine Gestalt verleihen. Er hat inzwischen eine vielseitige Sammlung außergewöhnlicher Skulpturen aus Holz, Metall und Kunststoff geschaffen.

Für dieses Werk inspirierte ihn ein Lichtspektakel am Himmel der südlichen Hemisphäre: die Aurora Australis. Das verdrehte Band symbolisiert die auf- und abwiegenden Lichtstreifen. Es wechselt von flach zu gebogen und verbindet sich schließlich mit sich selbst. Setzt man einen Finger auf die Skulptur und folgt ihrem Verlauf, berührt man währenddessen die gesamte Figur und kehrt am Ende dorthin zurück, wo man gestartet ist. Die Innenfläche ist demnach auch die Außenfläche des Stücks, was es zu einem Möbiusband macht, der einfachsten »nicht orientierbaren« Oberfläche. Letzteres bedeutet, dass man einem solchen Objekt keine Begriffe wie »vorne«, »hinten«, »innen« oder »außen« zuordnen kann.

Laut Séquin sind diese Visualisierungen nicht nur fesselnd, sondern sie verschaffen selbst »Menschen, die Mathe hassen, einen einfacheren Zugang zu abstrakten Konzepten«.

Buddhabrot (1993)

Ende des 20. Jahrhunderts eroberte die »Mandelbrotmenge« die Welt der Mathematik und der Kunst. Diese fraktale Menge ist nach dem französisch-amerikanischen Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924–2010) benannt, der in den 1970er Jahren als Erster fraktale Strukturen untersuchte. Sein 1982 erschienenes Buch »The Fractal Geometry of Nature« ist noch heute ein Klassiker.

Um zu prüfen, ob ein Punkt in der komplexen Ebene zur Mandelbrotmenge gehört, muss man seine Koordinaten in eine bestimmte Gleichung einsetzen. Das Ergebnis dieser Berechnung steckt man anschließend wieder in die Gleichung und wiederholt diese Prozedur immer weiter. Falls die dabei entstehenden Werte nicht unbegrenzt ansteigen, liegt der Ausgangspunkt innerhalb der Menge.

Die Mandelbrotmenge besteht aus faszinierenden Mustern, die sich beim Hinein- und Herauszoomen in der Ebene wiederholen. Sie ähnelt einem großen Käfer, der von kleineren Käfern umgeben ist, an denen noch kleinere Käfer kleben und so weiter.

Der Programmiererin Melinda Green gefiel diese Darstellung jedoch nicht. Anstatt bloß die Ausgangspunkte zu visualisieren, veranschaulichte sie, wie einige Punkte durch das Einsetzen in die Gleichung in der Ebene herumhüpfen. Was dabei auf ihrem Monitor erschien, erschreckte sie geradezu. Das so entstandene Bild ähnelt überraschenderweise einer Buddhafigur, die sie durch verschiedene Färbungen deutlich betont.

MELINDA GREEN

Einige Wissenschaftler halten es deshalb für falsch, Mathematik und Kunst strikt voneinander zu trennen. Sie versuchen beide Fächer zu verbinden, indem sie Probleme in der abstrakten Sprache von Zahlen und Gruppen formulieren und ihre Antworten in Metallen, Kunststoffen, Hölzern oder auf dem Computerbildschirm suchen. Sie weben, zeichnen und bauen. Viele »mathematische Künstler« tauschen sich jährlich auf der internationalen Bridge-Konferenz aus oder treffen sich auf der alle zwei Jahre stattfindenden Gathering 4 Gardner, benannt nach Martin Gardner, der 25 Jahre lang die beliebte Kolumne »Mathematical Games« für das Magazin »Scientific American« schrieb.

In den vergangenen Jahren hat das Interesse an mathematischer Kunst immer stärker zugenommen, was sich in der wachsenden Menge von Ausstellungen und akademischen Zeitschriften zu diesem Thema zeigt. Die Anfänge des gegenwärtigen Booms reichen bis zum Ende des 20. Jahrhunderts zurück. Inzwischen decken Künstler allerdings ein deutlich breiteres Spektrum an mathematischen Gebieten ab und verwenden modernere Werkzeuge beim Bau ihrer Kunstwerke. ◂

LITERATURTIPP

Gamwell, L.: Mathematics and Art: A Cultural Story. Princeton University Press, 2015

Die kulturelle Geschichte von Mathematik und Kunst, von der Antike bis heute

Hyperbolic Plane / Pseudosphere (2005)

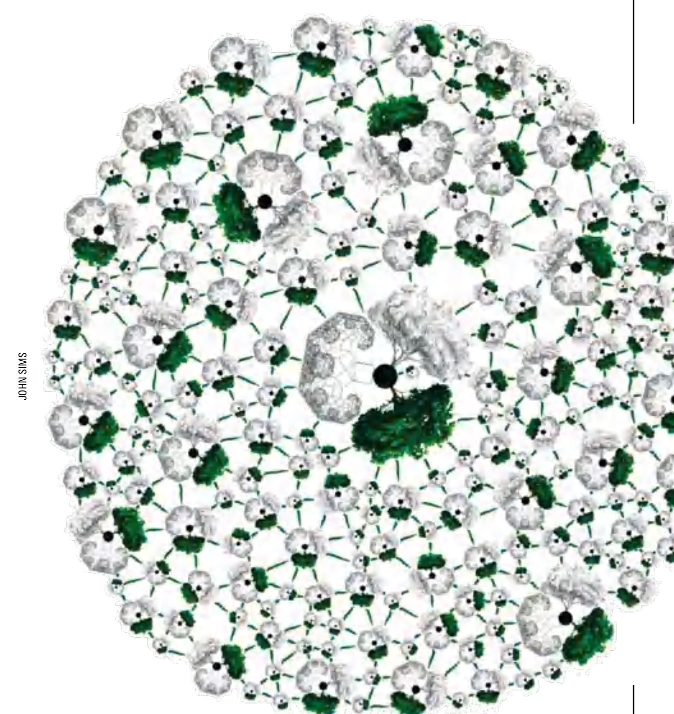
Daina Taimina begann ihr geometrisches Handwerk in den 1990er Jahren, als die heute pensionierte Mathematikerin von der Cornell University einen Kurs zu hyperbolischer Geometrie gab. In der Schule begegnen uns meist nur ebene Flächen, auf denen es beispielsweise nur genau eine Gerade gibt, die parallel zu einer vorgegebenen Geraden durch einen Punkt außerhalb dieser verläuft. Auf hyperbolischen Flächen gibt es dagegen mehrere solcher Objekte. Das liegt daran, dass diese Flächen eine konstante negative Krümmung haben – sie ähneln einem Sattel. Ein Beispiel dafür sind die krausen Ränder von Grünkohl.

Taimina wollte handfeste Modelle hyperbolischer Flächen kreieren, um ihren Studenten einen anschaulichen Eindruck negativer Krümmung zu vermitteln. Weil sie schon fast ihr ganzes Leben lang häkelt, war das ihr Mittel der Wahl. Mit einer Häkelnadel und Garn bewaffnet, begann sie hyperbolische Flächen zu erzeugen. Das hier gezeigte Exemplar ist eine so genannte Pseudosphäre, die überall negativ gekrümmt ist. Sie ist gewissermaßen das »Gegenteil« einer gewöhnlichen Kugeloberfläche, die in jedem Punkt eine positive Krümmung hat.

Taimina kann sich guten Gewissens als Erfinderin der »hyperbolischen Häkelarbeit« bezeichnen: Inzwischen hat sie Dutzende solcher Modelle in allerlei Farben hergestellt – das größte wiegt knapp acht Kilogramm.



DAINA TAIMINA



JOHN SIMS

Atomic Tree (2002)

Die Natur steckt voll fraktaler Muster, die in jeder Skalierung gleich aussehen, egal ob man hinein- oder herauszoomt: von den buschigen Brokkoliröschen bis hin zu zerklüfteten Gebirgszügen. Forscher können mit Fraktalen außerdem etliche interessante Phänomene untersuchen, wie die Struktur des Kosmos oder die Flugmuster von Vögeln.

Dieses Bild des in Florida lebenden Künstlers John Sims kombiniert drei Darstellungen von Bäumen: eine realistische Form, eine gezeichnete und ein baumförmiges Fraktal. »Es steht für die Schnittstelle von Mathematik, Kunst und Natur«, erklärt Sims. Diese drei Formen bilden einen Baustein, der sich in unterschiedlichen Größen innerhalb des gesamten Bilds wiederholt und zu einem großen Netzwerk zusammensetzt.

Sims stellte das Werk erstmals bei der MathArt / ArtMath aus, einer 2002 von ihm mitkuratierten Ausstellung am Ringling College of Art and Design in Florida. Außerdem kreierte er viele Werke, die von der Kreiszahl Pi inspiriert sind, darunter Steppdecken und Kleider. Mit seiner Kollegin Vi Hart produzierte er 2015 den Ohrwurm »Pi Day Anthem«, in dem sie, begleitet von Trommeln und Bässen, die Ziffern von Pi rezitieren.

Scarabs (2018)

Bjarne Jespersen bezeichnet sich selbst als magischen Holzschnitzer. Der dänische Künstler strebt nach Verwunderung: Er will, dass die Menschen seine Holzkreationen sehen, halten, bewegen und trotzdem nicht an sie glauben. »Ich sehe mich eher als Magier denn als Mathematiker oder Künstler«, sagt er.

Wenn man »Scarabs« in den Händen hält, merkt man schnell, dass die aus einem einzigen Buchenstück geschnitzte Kugel aus losen Käfern besteht. Dennoch greifen die Figuren ineinander und können nicht herausgelöst werden, ohne dass etwas zerbricht.

Für diese Arbeit inspirierte ihn der niederländische Künstler M.C. Escher, dessen Werke größtenteils mathematischer Natur sind. Escher machte geometrische Formen populär, die in einem sich wiederholenden Muster eine Ebene lückenlos bedecken. Mathematiker untersuchen seit Langem die Eigenschaften solcher Mosaikarbeiten – nicht nur auf ebenen Flächen, sondern auch in gekrümmten Räumen oder in höheren Dimensionen. Escher selbst ließ sich von der islamischen Kunst inspirieren, insbesondere von den Mustern, welche die Wände der Alhambra in Südspanien zieren. Für »Scarabs« verwendete Jespersen einen kleinen Käfer als Grundbaustein seiner Kachelung.



BJARNE JESPERSEN

1919

REPTILIEN PRÄPARIEREN LEICHT GEMACHT


Wirkt erschreckend lebendig: der präparierte Riesengürtelschweif aus Südafrika.

»Die Aufnahme zeig[t] einen Riesengürtelschweif, [der] an Naturtreue wohl kaum etwas zu wünschen [lässt], obgleich die Präparation in denkbar einfacher Weise erfolgt ist. Von einer kleinen Öffnung aus wird die Entleerung der Eingeweide vorgenommen und die Bauchhöhle bis zur Wiederherstellung der natürlichen Form mit Watte ausgefüllt. Darauf erfolgt die Härtung in 4%igem Formalin. Nach vollkommener Härtung in geeigneter Stellung läßt man das Tier an der Luft trocknen und überzieht es mit einer gesättigten Schellacklösung.« *Kosmos 8, S. 199–200*

BESSERE VERDAUUNG DANK KOT

»Da Kauwerkzeuge und Verdauungssäfte nicht zu einer vollständigen Verdauung pflanzlicher Nahrungsmittel [ausreichen], müssen Darmbakterien aushelfen. Schottelins fütterte steril aus dem Ei gekrochene Hühnchen mit sterilisierten Getreidekörnern, und obwohl die Menge genau gleich derjenigen war, welche im Freien lebende Kontrolltierchen erhielten, verkümmerten die Hühnchen. Sobald aber eine geringe Menge Hühnerkot mit dem Schnabel in Berührung gebracht wurde, begann eine normale Entwicklung, da Darmbakterien in den Verdauungskanal gelangten, welche die Nährstoffe zugänglich machten.« *Prometheus 1556, S. 376*

EIN BENZINTUNNEL NACH AMERIKA

»Nach dem Vorbilde der das Petroleum über hundert und mehr Kilometer den Industriezentren zuführenden Rohrleitungen ist ein abenteuerliches Projekt ausgearbeitet, Amerika und Europa durch eine auf dem Meeresboden verlegte Leitung zu verbinden. Sie soll aus weichen, spiralförmig gewundenen Stahlbändern mit Asbestverkleidung bestehen und mit Hilfe einer metallegierten Schutzschicht einen Innendruck von 150 Atmosphären und einen Außendruck von 700 Atmosphären ertragen. Die 45 cm weite Leitung soll in der Minute 3000 Liter befördern.« *Die Umschau 31, S. 492*

1969

SCHWEDISCHE FELSKUNST

»Im Gegensatz zu mancher Stätte der Vorzeitkunst liegen die nordischen Felsbilder meist still und abseits, fast unberührt und selbst von den Einwohnern kaum beachtet, ungeschützt unter freiem Himmel. Um den Darstellungen Dauer zu verleihen, wurden sie in den Stein eingraviert: ›Hällristningar‹ (Felsritzungen) heißen sie deshalb auf schwedisch. Die Entstehungsgeschichte der Ritzungen fällt zusammen mit der nordischen Bronzezeit, etwa 1600 bis 400 v. Chr.« *Kosmos 8, S. 332–335*


Im südschwedischen Simrishamn soll ein nordischer Gott diese Fußspuren im Stein hinterlassen haben.

IN-VITRO-BEFRUCHTUNG BESCHWÖRT ETHIKDEBATTE HERAUF

»Menschliche Eier können in vitro befruchtet werden. Dies zeigten die Versuche einer Forschergruppe der Universität von Cambridge. Damit dürften sich in naher Zukunft ethische Probleme erheben, beispielsweise die Frage, ob das Experimentieren mit ›lebenden‹ menschlichen Embryonen unmoralisch ist und ob die Vernichtung von Reagenzglas-Eiern einen ›Mord‹ darstellt. Die Übertragung von befruchteten Eiern in Kaninchen als Wirtstiere, was voraussichtlich die Untersuchung der Reifung des Embryos über das Zweizellen-Stadium hinaus erlauben würde, dürfte zweifellos die Kontroversen weiter anfachen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 349*

DIE SUCHE NACH GALAKTISCHEN REICHTÜMERN

»Die zahlreichen kleinen Himmelskörper, die in unserem Sonnensystem vor allem zwischen Mars und Jupiter kreisen, enthalten beträchtliche Mengen von Edelmetallen. Durch die ständigen Fortschritte der Weltraumschiffahrt dürften in einigen Jahren die technischen Möglichkeiten geschaffen sein, ihre Reichtümer für irdische Zwecke nutzbar zu machen. Amerikanische Astronomen richten ihr Hauptinteresse auf den Miniaturplaneten ›Ivar‹, der einen Durchmesser von 4 Kilometern hat und im Verdacht steht, gewaltige Platinmengen zu enthalten.« *Neuheiten und Erfindungen 391, S. 133*



FREISTETTERS FORMELWELT
NACH IHNEN!

Wie im echten Leben kommt es auch in der Mathematik häufig auf die Reihenfolge an – was einige Berechnungen verkompliziert.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

▸▸ spektrum.de/artikel/1654774

Vor Kurzem habe ich Kartoffelpüree zubereitet. Die Kartoffeln habe ich zuerst geschält, anschließend gekocht und danach zerstampft. Die Reihenfolge war dabei entscheidend: Hätte ich sie zuerst gestampft, dann gekocht und danach geschält, hätte das nicht nur viel länger gedauert; das Resultat wäre vermutlich auch nicht so lecker gewesen. Bei meinem Frühstück am nächsten Morgen war die Reihenfolge dagegen egal. Ob ich zuerst die Milch und dann mein Müsli in eine Schüssel gebe oder umgekehrt, spielt für den Geschmack keine Rolle.

In der Mathematik spricht man bei Fragen zur Reihenfolge von »Kommutativität«. Eine Operation zwischen zwei Objekten ist genau dann kommutativ, wenn folgende Formel gilt:

$$a \cdot b = b \cdot a$$

Der Malpunkt steht dort nicht zwangsläufig für die Multiplikation, sondern er symbolisiert ganz allgemein eine »binäre Verknüpfung«, also eine Operation, bei der man zwei Elementen ein drittes als Ergebnis zuordnet. Handelt es sich bei a und b zum Beispiel um reelle Zahlen, dann kann diese Verknüpfung etwa die Addition oder die Multiplikation sein. Beide Operationen sind in einem solchen Fall kommutativ: Es ist egal, ob man 7 + 3 oder 3 + 7 rechnet, es kommt jedes Mal 10 heraus. Die Subtraktion und die Division sind dagegen nicht kommutativ. Das Ergebnis der Rechnung 7 – 3 unterscheidet sich deutlich von 3 – 7, und sieben Drittel sind etwas anderes als drei Siebtel.

Komplizierter wird die Angelegenheit vor allem dann, wenn a und b keine Zahlen mehr darstellen, sondern beispielsweise Matrizen. In einer Matrix sind mathematische Ausdrücke in einer Tabelle zusammengefasst, mit der man genauso umgehen kann wie mit normalen Zahlen, sofern man sich an die richtigen Regeln hält.

Multipliziert man zwei solche Objekte miteinander, entsteht der erste Eintrag der Ergebnis-Matrix aus der ersten Zeile der ersten Matrix und der ersten Spalte der zweiten (indem man die jeweiligen Zahlen miteinander multipliziert und die Resultate anschließend addiert). Der zweite Eintrag der ersten Spalte ergibt sich aus der ersten Zeile der ersten und der zweiten Spalte der zweiten Matrix, und so weiter. Die Beschreibung des Vorgangs klingt komplizierter, als er ist – aber man erkennt sofort, dass es dabei auf die Reihenfolge ankommt. Daher ist die Multiplikation im Fall von Matrizen nicht kommutativ.

Für mich als Astronom ergibt das Sinn. Als ich während meines Studiums eine Vorlesung besuchte, bei der es unter anderem um »Matrizenoptik« ging, setzte ich mich erstmals ausführlicher mit der Multiplikation dieser mathematischen Objekte auseinander. In dem Kurs beschrieben wir Lichtstrahlen, die durch diverse optische Bauteile fallen. Jedes solche Element – eine Linse, ein Spiegel oder ein Prisma – lässt sich durch eine so genannte Transfermatrix darstellen; der Lichtstrahl selbst durch einen Vektor. Um ein optisches System mit verschiedenen Bauteilen (zum Beispiel ein Teleskop) zu beschreiben, muss man der Reihe nach die entsprechenden Transfermatrizen miteinander multiplizieren. Und da es entscheidend ist, in welcher Reihenfolge ein Lichtstrahl die unterschiedlichen Bauteile durchläuft, muss man aufpassen, wie man die Matrizen in der Berechnung anordnet.

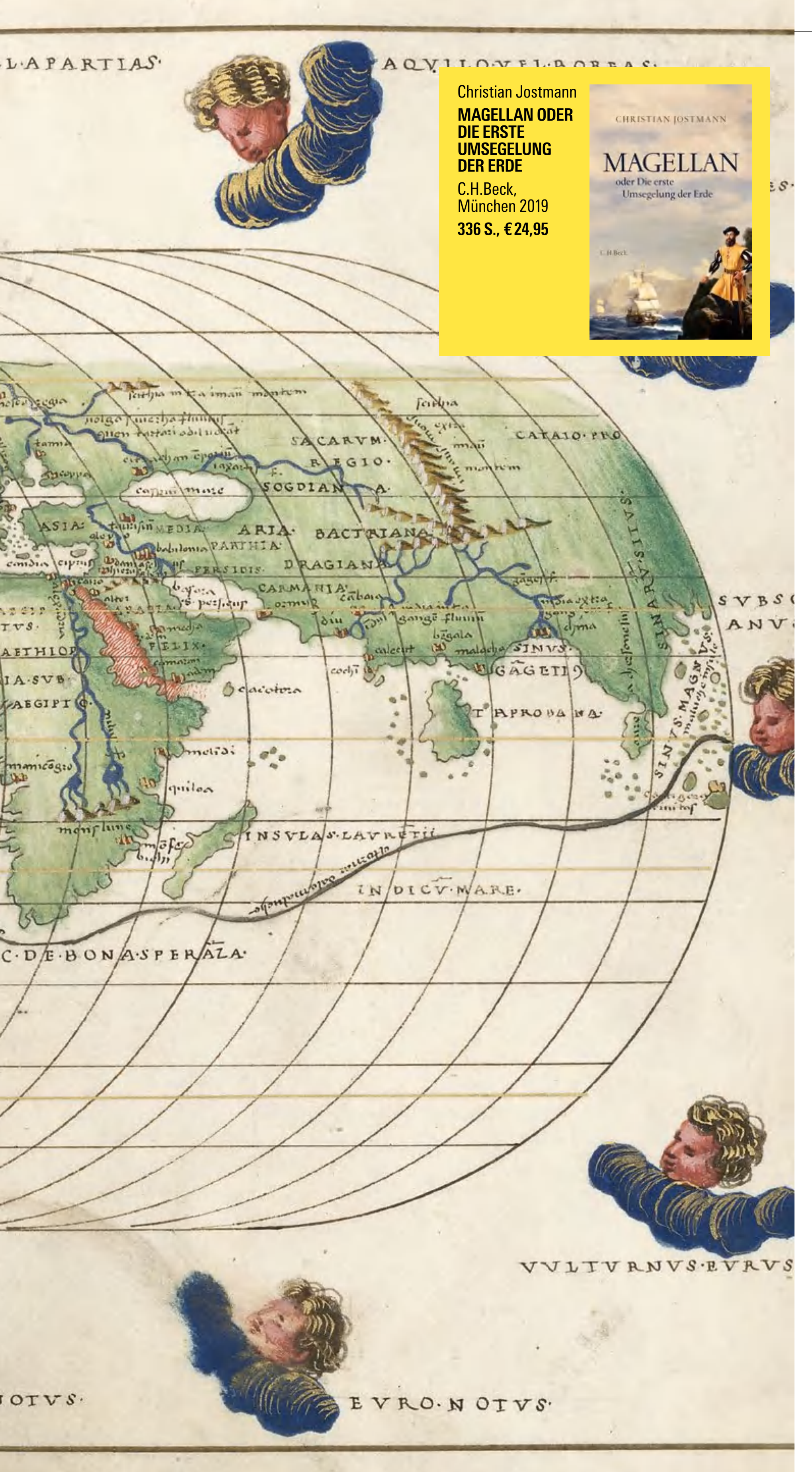
Doch nicht alle Probleme lassen sich durch eine korrekte Anwendung des Kommutativgesetzes lösen. Ob etwa zuerst die Milch und dann der Tee in die Tasse kommt oder umgekehrt, ist eine Frage, die vor allem in Großbritannien häufig heftige Diskussionen auslöst. George Orwell hat darüber ebenso philosophiert wie zahlreiche Wissenschaftler – bis heute ohne definitives Ergebnis. Mich stört das hingegen wenig, denn ich trinke Tee ohnehin lieber ohne Milch.

REZENSIONEN



Die erste Weltumsegelung verlief quer über den Pazifik – und tragischerweise nur unweit an zahlreichen Inseln vorbei, von denen die Seefahrer nichts wussten und auf denen sie dringend benötigte Vorräte hätten aufnehmen können.

LIBRARY OF CONGRESS, GEOGRAPHY AND MAP DIVISION (WWW.LOC.GOV/RESOURCE/G3200M.GCT00001/?SP=14); BATTISTA AGNESE: PORTOLAN ATLAS OF 9 CHARTS AND A WORLD MAP, ETC. DEDICATED TO HIERONYMUS RUFFAULT, ABBOT OF ST. VAAST. 1544.



Christian Jostmann
MAGELLAN ODER DIE ERSTE UMSEGELUNG DER ERDE
C.H.Beck, München 2019
336 S., € 24,95

LIBRARY OF CONGRESS, GEOGRAPHY AND MAP DIVISION (WWW.LOC.GOV/RESOURCE/G3200M.GCT00001/?SP=14); BATTISTA AGNESE: PORTOLAN ATLAS OF 9 CHARTS AND A WORLD MAP, ETC. DEDICATED TO HIERONYMUS RUFFAULT, ABBOT OF ST. VAAST. 1544.

GESCHICHTE
BIS DER WESTEN ZUM OSTEN WIRD

Ein neues Buch über Ferdinand Magellan und die fast gescheiterte erste Weltumsegelung.

Die »Vitoria« machte einen ziemlich abgewrackten Eindruck, als sie Anfang September 1522 in den Hafen von Sevilla einlief. Nur ständiges Pumpen konnte das Schiff vorm Untergang bewahren. Jämmerlich war auch der Zustand ihrer Mannschaft. Nur 18 Mann hielten an Bord die Stellung, von Krankheit, Hunger und Hitze gezeichnet – kein Wunder, denn sie waren jahrelang unterwegs gewesen und hatten als mutmaßlich erste Menschen einmal komplett die Erde umrundet. Anfangs fünf Schiffe und fast 250 Männer stark, war die Expedition am 10. August 1519 Richtung Westen in See gestochen, um nun drei Jahre später aus dem Osten zurückzukehren und damit die erste Weltumsegelung der Geschichte abzuschließen. Nicht unter den Rückkehrern war ausgerechnet der Kommandant der Expedition und jener Mann, dessen Name noch heute für seefahrerische Höchstleistung steht: Generalkapitän Fernão de Magalhães, besser bekannt als Ferdinand Magellan. Er war 1521 während eines Gefechts auf den Philippinen ums Leben gekommen.

Magellan war eine der treibenden Kräfte hinter der Unternehmung gewesen, wie Christian Jostmann in diesem Buch sehr anschaulich darlegt. Denn es gelingt dem Historiker und Journalisten nicht nur, Magellans berühmte Weltumsegelung einzufangen, sondern insbesondere im ersten Teil des Buchs deren Vorgeschichte detailliert und spannend in Szene zu setzen. Jostmann hat dabei in aufwändiger Recherche die wenigen Puzzleteile über das Leben des »berühmtesten Portugiesen vor Cristiano Ronaldo« zu einem stimmigen Bild zusammengefügt. Was nicht eben einfach ist: Während die Medien die Karriere des Fußballstars nahezu vollständig ausleuchten, kennt man von Magellan nicht einmal das Geburtsdatum.

Eines haben Sportler und Seefahrer aber gemeinsam: Beide wechselten für den Höhepunkt ihrer Karriere zu den Königlichen nach Spanien. Als »Fidalgo«, also als junger Angehöriger des niederen Adels, hatte Magellan zwar einige Fahrten unter portugiesischer Flagge nach Indien und Malakka (eine damalige Metropole im heutigen Malaysia) unternommen, war an Schlachten – etwa der Eroberung Mombasas – beteiligt und leistete Kriegsdienst in Nordafrika. Doch anscheinend blieben ihm weitere Fahrten in die Reichtum versprechenden Gewürzländer des Ostens verwehrt, so dass er sich nach anderen Möglichkeiten umsah. Gemeinsam mit dem Kaufmann Cristóbal de Haro plante er, eine Flotte zu den Molukken zu schicken, eine indonesische Inselgruppe und damals der einzige Gewürznelken-Exporteur. Für diese Expedition gewannen die beiden schließlich die kastilische Krone, genau genommen den gerade erst gekrönten König Karl V., als Investor. Es wundert nicht, dass die Portugiesen diese Initiative ihres Landsmanns als Hochverrat betrachteten.

Die Portugiesen betrachteten Magellan als Hochverräter

Jostmann zeichnet ein lebendiges Bild der Zeit, indem er sich vor allem auf offizielle Dokumente stützt, die Informationen über Verhandlungen und persönlichen Verbindungen liefern. Die damaligen Seefahrtunternehmungen waren höchst politische Angelegenheiten: Portugal und Spanien konkurrierten um nichts Geringeres als die Weltherrschaft. Zwar hatten die beiden Seefahrernationen den Erdball mit dem Vertrag von Tordesillas 1494 unter sich aufgeteilt: Portugal erhielt alles, was sich östlich einer Linie 1770 Kilometer westlich der Kapverdischen Inseln befand, Spanien alles westlich davon. Doch immer wieder entbrannten Konflikte darum, wo die entsprechende Grenze auf der anderen Seite des Erdballs verlief. Spanien erhob daher Anspruch auf die Molukken. Um eine Route dorthin durch eigenes Territorium nutzen zu können, mussten die Spanier den Weg nach Westen besser erkunden und zudem eine Wasserstraße finden, die den Atlantik und den Pazifik durch Amerika hindurch verband. Die Ausmaße dieses Kontinents konnten die damaligen Zeitgenossen kaum abschätzen.

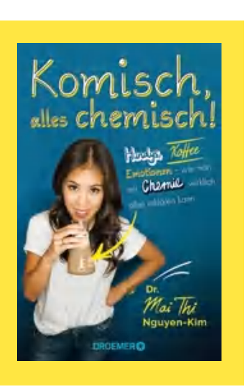
Auf hoher See hörte die Politik nicht auf. Zwar hatte der Generalkapitän um sich herum einen loyalen Trupp aus Verwandten, Bekannten und Landsleuten geschart, doch andere Führungskräfte begehrten unterwegs gegen ihn auf – sicher auch, weil Magellan nicht unbedingt ein Freund von Transparenz und Kommunikation war. Es entwickelte sich ein Seefahrtabenteuer mit so ziemlich jeder Dramatik: eine blutig niedergeschlagene Meuterei, ein abtrünniges Schiff, Stürme, Skorbut und Konflikte mit Indigenen. Jostmann beschreibt das im ebenso spannenden zweiten Teil des Buchs, stellt dabei klar heraus, was Mythos und was belegtes Geschehen ist, und ergänzt seinen weitgehend chronologisch ausgebauten Bericht mit wertvollen Informationen zur Schifffahrt dieser Zeit. Im Inneren des Einbands unterstützen den Leser eine Weltkarte mit der nachgezeichneten Route Magellans sowie eine Grafik, die den Aufbau eines Segelschiffs des 16. Jahrhunderts erklärt.

Die Entdeckung der nach Magellan benannten Meeresstraße nördlich von Feuerland, die seine Schiffe an kargen Bergen vorbei in den Pazifik führte, markierte erst die Halbzeit jener berühmten Weltumsegelung, die so nie geplant war. Nach einer langen, buchstäblichen Durststrecke erreichte die dezimierte Mannschaft schließlich Anfang November 1521 auf zwei Schiffen die Molukken. Magellan war da längst tot. Fast ein Jahr später kehrte allein die »Vitoria« nach Spanien zurück – kaum noch fahrtüchtig, aber mit dem Bauch voller Gewürznelken.

Ebenso erfüllt, aber weit weniger erschöpft lässt das Buch auch die Leser zurück. Jostmann verknüpft gekonnt die historischen Quellen zu einer spannenden Erzählung, ohne Überlieferungslücken mit Spekulationen zu füllen und somit den Sachbuchcharakter aufzuweichen. Man merkt, dass der Autor in dem Genre zu Hause ist, hat er sich doch bereits in früheren Büchern auf historische Reisen begeben – etwa auf die Spuren Amundsens und Scotts oder auf alten Pilgerpfaden nach Rom. Seinen Magellan-Bericht bereichert er mit geografischen, sozialen und wirtschaftlichen Exkursen, verliert aber nie das Thema aus den Augen. Zwar wendet sich der Band eher an interessierte Laien, wie die wenigen, eher überflüssigen Fußnoten nahelegen, doch dürfte er auch für Experten einen gelungenen Überblick bieten. Ein hilfreiches Personenverzeichnis sowie eine umfangreiche Bibliografie haben es leider nicht ins Buch geschafft, sondern sind lediglich auf der Website des Autors abrufbar.

Der Rezensent Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena.

Mai Thi Nguyen-Kim
KOMISCH, ALLES CHEMISCH!
Handys, Kaffee, Emotionen – wie man mit Chemie wirklich alles erklären kann
Droemer, München 2019
256 S., € 16,99



CHEMIE
FRÜHSTÜCKSKAFFEE UND BAKTERIEN MIT FLATULENZEN

Die Youtuberin Mai Thi Nguyen-Kim weckt Begeisterung für die Chemie.

Mai Thi Nguyen-Kim hat eine Mission: Die Chemikerin und Youtuberin möchte das Wissen über Chemie populär machen. Um ihrem Publikum die Berührungsangst vor dem Fach zu nehmen, schildert sie in diesem Buch

den Ablauf eines ganz normalen Tags. Was sie zwischen morgens und abends die Hand nimmt, isst oder womit sie sich wäscht, damit befasst sie sich aus der Perspektive ihrer Wissenschaftsdisziplin. Zudem will sie zeigen, dass Chemiker(innen) ganz normale Menschen sind. Also plaudert sie nebenher über ihr Leben, ihre Familie und den Liebeskummer ihrer besten Freundin.

Der Tag beginnt in dem Buch mit dem schrillen Klingeln des Weckers, den ihr Freund mal wieder zu laut gestellt hat. Es folgt das Koffein im Frühstückskaffee, ein Exkurs in das richtige Aufladen des Smartphone-Akkus und etliches mehr. Am Ende beschließt die Autorin den Tag mit einem geselligen Wein am Abend.

Bei alldem führt Nguyen-Kim originell in die Grundprinzipien der Chemie ein, beispielsweise in das Teilchen- und Schalenmodell, das Konzept der Wasserstoffbrücke oder die Oktettregel. Zudem vermittelt sie zahlreiche Details am Rand. So beschreibt sie nicht nur, wie der Wecker klingelt, sondern stellt auch die Hormone vor, die der Körper zum Wachwerden aktiviert, und erklärt deren Wirkung. Zusätzlich gibt sie immer wieder alltagsrelevante Tipps, indem sie zum Beispiel erklärt, wieso man Kaffee besser erst eine Stunde nach dem Aufstehen trinken sollte oder warum tägliches Duschen gar nicht so gut ist (weil die Tenside und andere Bestandteile des Duschgels die hydrophile Schutzschicht der Haut zerstören).

Die Autorin erklärt die chemischen Zusammenhänge originell, fachlich kompetent, gut recherchiert und jeweils mit Quellenangabe. Sie führt chemische Strukturformeln an und geht auch anderweitig durchaus ins Detail. Trotzdem kommt der Humor nicht zu kurz; so tauchen die Kariesbakterien mit ihren säurehaltigen Ausscheidungen als pupsende Wesen im Zahnbelag auf. Die Autorin schreibt dazu, dies sei vielleicht nicht die akkurateste Analogie, aber Kinder würde sie damit zum Lachen bringen, die sich dann die Zähne besser putzen.

Aber das Buch hat noch eine andere große Stärke. Denn immer wieder weckt die Autorin die Skepsis gegenüber wissenschaftlichen Ergebnissen. Nguyen-Kim zeigt oft Schwachstellen einzelner Studien auf, etwa eine zu geringe Probandenzahl. Damit möchte sie erreichen, dass weniger Menschen neuen wissenschaftlichen Hypes gedankenlos hinterherlaufen, und generell ein Gespür dafür vermitteln, was eine zuverlässigee Information ist. Einige Studien schildert sie in dem Zusammenhang ausführlicher, etwa zur Wirkung von Zitrusduft. Psychologinnen hatten in einem Experiment festgestellt, dass Teilnehmer sich unter dessen Einfluss ordentlicher und fairer verhalten. Unter Berücksichtigung der Versuchsbedingungen ist die Studie aber alles andere als aussagekräftig.

Ausführlich plaudert Nguyen-Kim über ihre persönliche Begeisterung für

Chemie oder auch darüber, in welche Männer ihre Freundin verknallt ist. Das mögen manche Leser(innen) fehl am Platz finden, doch ist zu bedenken, dass die Autorin erfolgreiche Youtuberin ist und ein Großteil ihres Publikums aus Mädchen im Teenageralter besteht. Ihr Wissenschaftskanal »maiLab« hat inzwischen fast 350 000 überwiegend junge Abonnent(inn)en, und das ist eine Zielgruppe, die sich eben unter anderem dafür interessiert, dass Mais Freundin Christine die übertriebene Angst ihres Freundes vor Fluoriden doof findet, wie man Ärger auf dem Universitäts-Campus vermeidet oder wie lange es dauert, ein Youtubevideo zu drehen.

Die Geheimnisse eines Schokoladenkuchens – natürlich mit chemischen Details

Oft wirkt es reichlich übertrieben, wenn die Autorin von ihrer Begeisterung für Chemie schwärmt. Hier hat vielleicht eine gewisse amerikanische Theatralik in Harvard abgefärbt, wo Nguyen-Kim promoviert hat, oder auch die plakative Manieriertheit, die bei Youtuber(inne)n typisch ist. Wer jedoch über die geschwätzigen Teile hinwegsehen kann, findet ein unterhaltsames Chemiebuch vor, das am Ende sogar die Geheimnisse eines perfekten französischen Schokoladenkuchens verrät. Natürlich mit allen chemischen Details, darunter der Strukturformel des Schokoladenbestandteils Theobromin.

Das Buch gibt es zudem als sechsstündiges Hörbuch, vorgelesen von der Autorin. Mit seinen plaudernden Passagen und der Mischung aus Faktischem und Anekdotischem erweist es sich als unterhaltsam und eignet sich etwa für längere Bahn- oder Autofahrten.

Die Rezensentin Katja Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

MORALPHILOSOPHIE

ANLASS ZU ZUVERSICHT?

Wissenschaft und Technik entwickeln sich ständig weiter. Machen wir auch in moralischer Hinsicht Fortschritte?

Da der normale Alltag keine Nachricht wert ist, dominieren in den Medien die sensationellen Ausnahmen wie Krieg und Verbrechen, Gewalt und amoralische Extravaganzen. Daraus entsteht der Eindruck, überall nähmen die Untaten zu und es herrsche ein allgemeiner sittlicher Verfall. Anhand von Fakten tritt der Philosoph Michael Shermer den Gegenbeweis an.

Seine Grundthese: Seit 500 Jahren, als mit der europäischen Aufklärung der Siegeszug von Wissenschaft und Technik die Welt zu erfassen begann, hat die Menschheit auch in moralischer Hinsicht enorme Fortschritte gemacht. Dank der Zivilisierung bleiben Kooperation und Altruismus nicht mehr auf die Familie, den Klan, den Stamm oder die Ethnie beschränkt, sondern prägen ganze Nationen und Staatenbünde. Tribale Konflikte sind nicht mehr die Regel, Alltagsprobleme werden fast immer friedlich – notfalls vor Gericht – bereinigt. Gewaltverbrechen, Mord und Totschlag werden tendenziell seltener.

Darin sieht der Autor den Beweis, dass die Menschheit in moralischer Hinsicht immer »besser« wird. Zum Beleg führt er diverse Fakten ins Feld; viele sind überzeugend, nicht alle unumstritten. So beruft er sich auf das Buch »Gewalt: Eine neue Geschichte der Menschheit« des amerikanischen Evolutionspsychologen Steven Pinker. Dieser behauptet einen generellen Rückgang der Gewalt während der Menschheitsgeschichte, ausgehend von enorm hoch eingeschätzten Tötungsraten in archaischen Jäger-und-Sammler-Kulturen gegenüber einer vermeintlich wenig kriegerischen Gegenwart. Doch die archäologischen Funde lassen im Hinblick etwa auf die Steinzeit auch viel weniger gewaltsame Deutungen zu, und in der Gegenwart herrscht zwar zwischen den Industrieländern prekärer Friede, doch in ärmeren Weltregionen toben zahlreiche blutige Konflikte.

Zumindest für den zivilisatorischen Fortschritt der Neuzeit in den Industrieländern kann Shermer positive Indizien anführen. Doch was ist mit den technischen Massenmorden im 20. Jahrhundert? Bei deren Einschätzung wirkt wohl Shermers amerikanische Prägung mit: Die USA haben in den Weltkriegen keine Verwüstung des eigenen Lands erdulden müssen, sondern ausschließlich auf fremdem Boden die aggressiven Mächte Deutschland und Japan niedergerungen – wenngleich unter erheblichen Verlusten.

Überhaupt wirkt der Autor sehr »amerikanisch«. In seiner Jugend hing er einer evangelikalen Sekte an und vertrat radikal libertäre Positionen, lehnte also jede Einmischung des Staats ins Wirtschaftsleben ab. Heute gibt er die Zeitschrift »Skeptic« heraus und argumentiert in seiner Kolumne für die Zeitschrift »Scientific American« aufklärerisch und antireligiös. Ein Kapitel im seinem Buch trägt den Titel »Warum Religion keine Quelle der Moral ist«.

In den USA gilt Shermer damit wohl als typischer »Liberal«, womit dort jemand gemeint ist, den wir hier zu Lande als eher links einstufen würden. Sein Buch liefert interessante Fakten zum Wandel moralischer Einstellungen und zur Rolle der Gewalt in der Moderne. Zu der verlässlich edierten und gut lesbar übersetzten deutschen Ausgabe ist nur kritisch anzumerken, dass mehrere der in den Anmerkungen angegebenen Links nicht mehr funktionieren.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Michael Shermer
DER MORALISCHE FORTSCHRITT
Wie die Wissenschaft uns zu besseren Menschen macht
Alibri, Aschaffenburg 2019
565 S., € 29,–



BOTANIK

ALTE PFLANZENNAMEN ERKLÄRT

Ob Hasenbrot oder Schwanenblume: Dieses Buch möchte ihre Namen erklären.

Rosemarie Gebauer
HUNDSROSE UND KATZENMINZE
Wie die Rose zum Hund kam und die Minze zur Katze
Transit, Berlin 2019
144 S. € 19,80



»Grün« verkauft sich derzeit offensichtlich gut: Dies ist bereits der vierte Band einer Reihe gleich gestalteter Büchlein, die sich mit alten Namen von Blütenpflanzen befassen. Das spiegelt sich in deren Titel wieder, etwa »Jungfer im Grünen und Tausendgüldenkraut« beim ersten Band der Reihe, oder jetzt eben »Hundsrose und Katzenminze«. Das Anliegen lautet in jedem Fall, die vor allem im Volksmund noch existierenden alten und zum Teil wirklich seltsamen Namen ihrer (vermutlichen) Herkunft nach zu erklären.

Die Auswahl dieses Bands beschränkt sich auf insgesamt 42 Tiere im Namen, alphabetisch von »Bär« bis »Wurm«. Manchmal bezieht sich der Begriff im Pflanzennamen nur auf eine Tierart, etwa beim »Igelkolben«, manchmal auf mehrere Spezies aus völlig unterschiedlichen Gattungen oder Familien, zum Beispiel bei »Gänsedistel«, »Gänsefußgewächse« und »Gänseblümchen«. Alles in allem porträtiert die Autorin zirka 70 Pflanzenarten.

Gebauer erzählt in dem Zusammenhang gelegentlich auch mythische Geschichten und erwähnt bei einigen Arten die frühere beziehungsweise heutige medizinische Verwendung. Hier und da sind Gemälde abgebildet, in denen Blütenpflanzen eine Rolle spielen. Das alles ergibt einen Mix aus Botanik, Aberglauben, Sagen und Legenden, Kunst und zahlreichen passenden Illustrationen. Die rein botanischen Abbildungen stammen fast alle aus den hervorragenden Werken »Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz« von Otto Wilhelm Thomé (1885) und »Deutschlands Flora in Abbildungen« von Johann Georg Sturm (1796).

Bücher über Pflanzennamen haben in Deutschland eine lange Tradition. Erwähnt seien nur das »Handwörterbuch der Pflanzennamen« von Robert Zander (1927), die Bibel der Gärtner, und das »Wörterbuch der deutschen Pflanzennamen« von Heinrich Marzell (1943–1979) in insgesamt fünf Bänden mit rund 3400 Seiten, in dessen Tradition auch die Autorin steht. Gebauer ist Diplombiologin, war wissenschaftliche

Angestellte an der Freien Universität Berlin, arbeitet aber seit 30 Jahren an Museen und in Parks in Berlin und Brandenburg, wo sie Führungen und Exkursionen anbietet. Die auf der Rückseite zitierte »Berliner Morgenpost« beschreibt das so: »Pflanzen können die ganze Welt erklären – zumindest, wenn man jemanden wie Rosemarie Gebauer hat, die übersetzen kann, was uns Pflanzen sagen.«

Diesen Anspruch freilich kann das kleine Buch nicht ganz erfüllen. Die Auswahl der behandelten Pflanzen wirkt ziemlich willkürlich. Den Wachtelweizen hätte ich erwartet, auch das Läusekraut, nicht aber den Kanarischen Drachenbaum oder die Kobralilie. Die Beschreibungen zu einzelnen Pflanzen sind von sehr unterschiedlicher Qualität. Der Keulen-Bärlapp ist ganz sicher keine Allerweltsart; er hätte es verdient, wegen seiner Abweichungen von den Blütenpflanzen etwas genauer beschrieben zu werden. Stattdessen bleibt an der entsprechenden Stelle im Werk eine Dreiviertel Buchseite frei. Der Name der Schwanenblume soll sich laut der Autorin von den weißen Blütenblättern »mit einem Hauch von Rosa« ableiten: weiß wie der Schwan, das Rosa »im Schnabel gebündelt«. Der einem Schwanenhals viel stärker ähnelnde Fruchtknoten mit den gebogenen Griffeln ist als Erklärung für den Pflanzennamen zwar weniger »poetisch«, dafür aber deutlich einleuchtender.

Gänseblümchen prägten früher die Gänseweiden

Das Gänseblümchen, über das allein man ein ganzes Buch schreiben könnte, bekommt in dem Werk 15 kurze Zeilen. Diesen zufolge steht das Gewächs »wie unsere Hausgans auf einem Bein und ist mit den Farben weiß und gelb ausgestattet«. Das ist weit hergeholt. Gänseblümchen heißen so, weil sie früher – neben dem Gänsefingerkraut – ein bestimmendes Element der Gänseweiden rund um die Dorfweiher bildeten. Ansonsten verweist die Autorin hier auf eines ihrer weiteren Bücher und ausdrücklich auf ein sehr schönes Bild von Hans Memling »Thronende Maria mit Kind, um 1480/90«, obwohl direkt daneben wieder eine halbe Seite frei bleibt.

Diese Leerräume treten in dem Buch häufiger auf und machen in der Summe mindestens 20 Seiten aus. Das großzügige Layout ist aber sicherlich so geplant und macht das Buch luftiger, was ein Verkaufsargument sein mag. Pflanzenkennern bringt das Werk eher wenig, als Geschenk für Pflanzeninteressierte mit geringeren Vorkenntnissen aber könnte es gut ankommen.

Der Rezensent Jürgen Alberti ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

MEDIZIN

WEGE ZU MEHR LEBENSQUALITÄT

Zwei Schmerzexperten beschreiben Diagnose- und Therapiemöglichkeiten sowie neue Forschungsansätze, um chronische Pein erträglicher zu machen.

Thomas R. Tölle, Christine Schiessl
DAS HANDBUCH GEGEN DEN SCHMERZ
Rücken, Kopf, Gelenke, seltene Krankheiten: Was wirklich hilft
ZS Verlag, München 2019
304 S., € 24,99



Schmerzen gehören zu den gesundheitlichen Komplikationen, die die Lebensqualität am stärksten beeinträchtigen. Wenn sie dauerhaft anhalten, führen sie bei den Betroffenen zu einem Gefühl der Hilflosigkeit und des Ausgeliefertseins, bis hin zu Depressionen und Selbstmordgedanken. Dabei hat die moderne Medizin viele Möglichkeiten, um Schmerzen abzustellen oder wenigstens so weit zu lindern, dass die Patienten ein erfülltes Leben führen können. Warum erfahren trotzdem immer noch zahlreiche Schmerzpatienten eine medizinisch unzureichende Behandlung? Und wie lässt sich das ändern? Dem geht dieses Buch nach, das zwei renommierte Schmerzmediziner herausgegeben haben: Thomas R. Tölle, Leiter des Zentrums für Interdisziplinäre Schmerzmedizin am Klinikum rechts der Isar der TU München, und Christine Schiessl, Chefärztin der Algesiologikum-Tagesklinik für Schmerzmedizin in München. In dem umfassenden Ratgeber erfahren Interessierte, wie Schmerz entsteht, welche Formen er annehmen kann und wie er sich behandeln lässt.

Chronischer Schmerz betrifft viele. In Deutschland leiden allein 23 Millionen Patienten daran – als Begleiterscheinung von Krankheiten; infolge von Verletzungen oder Operationen; oder aus ungeklärten Gründen, weil sich keine organische oder psychische Ursache finden lässt. Ärzte nehmen vor allem die letzten Fälle oft nicht ernst und finden deshalb häufig nicht die richtige Behandlung dafür. Das ist für die Betroffenen doppelt fatal: Einerseits wegen des Schmerzes selbst, andererseits wegen der Scham über das vermeintlich einbildete Leiden, die in vielen Fällen zu sozialem Rückzug und Isolation führt. Umso mehr erstaunt es, dass Deutschland zurzeit weltweit das einzige Land ist, in dem Schmerz offiziell als Krankheit mit eigener Diagnoseziffer anerkannt ist. Allein die Tatsache, dass der Arzt die Schmerzbehandlung abrechnen kann, verbessert die Situation der Patienten enorm.

Das Buch thematisiert diese Dinge auf einfühlsame Weise und möchte den Patienten Mut machen, sich nicht mit ihrem Schicksal abzufinden. Jeder Schmerzpatient, so die Autoren, verdiene eine angemessene Behandlung, denn jeder Schmerz sei real, gleich ob eine Ursache dafür dingfest gemacht werden könne oder nicht. Obgleich Schmerzen etwas höchst Subjektives sind, lassen sie sich durch bildgebende Verfahren mittlerweile auch objektiv sichtbar machen.

Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen der Schmerzentstehung besprechen die Autoren verschiedene Schmerzarten in jeweils eigenen Kapiteln. Dabei gehen sie auf Rücken-, Nacken-, Muskel-, Kopf-, Gelenk-

Bauch- und Nervenschmerzen ein, ebenso auf Schmerzen bei Krebs, nach Operationen und Verletzungen. Weiterhin zur Sprache kommen das oft extrem belastende und schwer greifbare Fibromyalgie-Syndrom sowie das komplexe regionale Schmerzsyndrom, bei dem meist infolge einer Verletzung unverhältnismäßig starke Qualen entstehen, die sich schwer behandeln lassen. Für jedes Kapitel zeichnen spezialisierte Fachärzte verantwortlich, die Kinder und Erwachsende jeweils separat betrachten. Zusätzlich berichten Patienten von ihren Leidensgeschichten und schildern, was ihnen letztlich half, mit dem Schmerz fertig zu werden.

Der letzte Teil des Werks konzentriert sich auf die diversen Therapieformen, von denen die medikamentöse Behandlung nur eine ist – neben Psycho-, Bewegungs- oder Kunsttherapie, Akupunktur, Achtsamkeitstraining, Heilfasten, verschiedenen Entspannungstechniken und anderen. Das Buch macht deutlich, dass keine Behandlung bei allen funktioniert und ein einfaches »Wegdrücken« der Pein mit einem Arzneistoff höchstens kurzfristig funktioniert. Stattdessen, so die Autoren, müsse jeder Patient ganzheitlich betrachtet werden und seinen eigenen Weg finden, mit dem Schmerz umzugehen. Dazu gehörten oft vor allem Verhaltensänderungen, und häufig müssten die Betroffenen viel ausprobieren, bis sie einen für sich passenden Ansatz finden. Im Zusammenhang mit Schmerzmitteln behandeln die Autoren auch häufig tabuisierte Probleme wie Medikamentenabhängigkeit und -missbrauch sowie medikamenteninduzierten Schmerz. Weiterhin stellen sie verschiedene Anlaufstellen für Schmerzpatienten vor.

Das Buch besticht mit hoher Informationsdichte und übersichtlicher, ansprechender Gestaltung einschließlich farbig hinterlegten Textkästen und mehrfarbigen Grafiken. Die Patientenberichte können Betroffenen Mut machen. Am Ende bleibt die Erkenntnis, dass es in der Medizin nicht unbedingt immer darum gehen kann, Schmerzfreiheit zu erreichen, sondern das oberste Ziel lauten sollte, den Patienten mehr Lebensqualität zu bieten. Und dorthin führen viele Wege, wie der Band aufzeigt.

Die Rezensentin Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Verena Leusch (Volontärin), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Susanne Lipps-Breda, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich. Ansprechpartnerin: Anja Väterlein, E-Mail: anja.vaeterlein@iqm.de

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1.1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek





LESERBRIEFE

»BÜRGERWISSENSCHAFTLER« LANGE IGNORIERT

Ökologe Josef Settele trug zusammen, was über den Schwund an Insektenbeständen und dessen Ursachen bekannt ist. (»Beunruhigender Sinkflug«, **Spektrum** Mai 2019, S. 12)

Tim Laußmann, Leverkusen: Als »Bürgerwissenschaftler« mit naturwissenschaftlicher Ausbildung, der sich seit 30 Jahren intensiv mit der Beobachtung von Tag- und Nachtfaltern im Raum Wuppertal befasst, kann ich mich den Ausführungen nur anschließen. Wir blicken mit dem Naturwissenschaftlichen Verein Wuppertal auf mehr als 150 Jahre gut dokumentierte Schmetterlingsbeobachtung zurück. Aus diesen Daten geht eindeutig hervor, dass der wesentliche Artenverlust, insbesondere bei hoch spezialisierten Arten, mit der Flurbereinigung in den 1950er Jahren einherging. Damals mussten mit Hecken umsäumte kleinteilige Parzellen zu Gunsten großer Agrarflächen weichen, die leicht maschinell zu bewirtschaften sind. Das Problem für die Falter: Nicht nur der Nektar war verschwunden, sondern auch die Nahrungspflanzen der Raupen – Weide, Schlehe, Weißdorn, Holunder und viele andere Gehölze sowie diverse Kräuter in Saumbereichen. Nur mit Blühstreifen an Ackerrändern wird es daher für Schmetterlinge nicht getan sein. Ein Weiteres trägt die Versiegelung der Landschaft bei. Schmetterlinge überwintern je nach Art als Ei, Raupe, Puppe oder Schmetterling. Alle diese Stadien brauchen ihre speziellen Verstecke – Nischen und Ritzen, Höhlen, Steinhaufen, Reisig und so weiter, und dies im Verbund mit den Lebensräumen der Falter und Raupen.

Dies alles wurde von uns ehrenamtlichen Insektenkundlern spätestens in den 1980er Jahren erkannt und zahlreich publiziert, jedoch kaum beachtet. Über Jahrzehnte wurden die »Bürgerwissenschafter« von der Politik – zumindest gefühlt – als liebenswerte Querulanten mit Außenseiterhobby angesehen. Aus meiner Sicht ist nun ein gesellschaftlicher Konsens wichtig: Niemand will Landwirtschaft wie im Mittelalter betreiben, aber kann man der Natur angesichts unserer Überproduktion nicht etwas zurückgeben? Die Bauern sind ebenso wenig schuld an der Misere, sie sind wirtschaftlichen Zwängen unterworfen, die falsche Anreize setzen. Wenn wir Insekten als wertvoll erkennen, dann kann man deren Förderung auch finanziell vergüten.



Der erschreckende Rückgang der Biomasse von Fluginsekten, den Forscher über Jahrzehnte beobachtet haben, war Thema unseres Maihefts.

Joachim Lorenz, Karlstein am Main: Ohne Zweifel ist die Wahrnehmung, dass es weniger sichtbare Insekten gibt als früher, richtig – auch wenn die Lichtfalle wohl nur einen kleinen Teil der Insekten erfasst, denn viele leben außerdem unbeachtet im Boden. Die Gründe kann man aber ebenfalls wahrnehmen. Die Vielfalt und die Masse der Insekten fußt auf einer kleinräumigen Kulturlandschaft mit artenreichen Pflanzen als Nahrung – nicht auf der Natur. Wenn man diese als ungesteuertes Stück Land als Gegensatz zur Kultur ansieht, dann gibt es in Deutschland seit Jahrhunderten keine Natur mehr.

Wenn man ein Land sich selbst überlässt, wie im Bayerischen Wald, dann ist das Ergebnis immer der Wald. Und der ist gegenüber einer Kulturlandschaft artenarm. Es ist doch auffällig, dass meistens ehemalige Kiesgruben, Steinbrüche, alte Weinberge, Bergbaulandschaften, von Schafen kahl gefressene Heiden, alte Hutewälder zur mittelalterlichen Tiermast und so weiter zu Naturschutzgebieten erkoren werden. Die Pflanzen und Tiere gibt es dort nur, weil der Mensch Freiflächen geschaffen hat. Ein Erhalt dieser Stadien in einer natürlichen Sukzession ist immer mit einem dauerhaften Aufwand durch Menschen verbunden.

Udo Becker, Marburg: Wie konnte es passieren, dass die Wissenschaft sich so lange nur mit dem Artenschwund beschäftigt hat, das Problem der abnehmenden Individuenzahl aber nicht beachtet hat? Es ist meiner Beobachtung nach ein Phänomen der Generationenfolge. Für junge Menschen ist es selbstverständlich, dass man weit fahren muss, um Orchideenstandorte zu finden oder nicht alltägliche Vögel zu beobachten. Man beschränkt sich auf Biotopschutz und bewahrt die wenigen Individuen selten gewordener Arten. Anblicke von blühenden Wiesen, Massen von Insekten, Fließgewässer, in denen große Fischschwärme als dunkle Wolken erscheinen, fehlen. Die junge Generation auch der Wissenschaftler geht von einer Normalität aus, die

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

für uns Alte nicht normal ist und die, wie man allmählich begreift, nicht normal sein darf.

Selbst in dem **Spektrum**-Artikel ist die wichtige Rolle der Fließgewässer kaum erwähnt. Gerade dort ist aber die Verarmung an Insekten gravierend. Kleinere Gewässer unterliegen einem hohen Risiko, dass durch einmalige Ereignisse wie Gewitter, Abschwemmungen von Pestiziden oder von Gülle ganze Jahrgänge von Wasserinsekten vernichtet werden. Diese sind aber in der Nahrungskette wichtig. Bei dort lebenden Fischen ist nicht nur die Artenvielfalt, sondern auch die Individuenzahl zurückgegangen. Meine nicht wissenschaftlich begründbare, langjährige Erfahrung mit Fließgewässern sagt mir, dass vielleicht noch 20 Prozent der in meiner Jugend vorhandenen Fischbestände vorhanden sind.

UNTERSCHÄTZTER MOND

Die Bewegungen von Erdplatten spielten möglicherweise eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung des Lebens. (»Leben durch Plattentektonik?«, **Spektrum** März 2019, S. 42)

Gerhard Wedekind, per E-Mail: Ein Leserbrief im Maiheft (»Mond und Plattentektonik«, **Spektrum** Mai 2019, S. 95) beschäftigte sich mit der möglichen Rolle des Mondes. Auch ich halte es für wahrscheinlich, dass dieser starken, nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Plattentektonik hat.

Die Erde hat als einziger Planet im Sonnensystem einen großen Mond. Wir leben also eher in einem Doppelplanetensystem. Andere feste Planeten, wie unser »Schwesterplanet« Venus, sind geologisch träge. Plattentektonik findet man am ehesten noch auf den Jupitermonden, die ebenfalls sehr starken Gezeitenkräften ausgesetzt sind.

Im Devon (vor zirka 400 Millionen Jahren) hatte das Erdjahr noch 400 Tage. Aus der Rate der Abbremsung lässt sich abschätzen, dass die Leistung infolge der Gezeitenreibungsverluste etwa ein Zehntel des Wärmestroms aus der Erde beträgt (der wohl hauptsächlich durch Zerfallswärme erzeugt wird). Das scheint nicht viel, aber die Reibungskräfte sind im Gegensatz dazu horizontal gerichtet und halten die Erdkruste gegenüber dem Kern etwas zurück. Dies kann durchaus Kräfte erzeugen, die eine Plattentektonik zumindest mit beeinflussen.

ERRATUM

»Primpolynome«, **Spektrum** Juli 2019, S. 26

Im Kasten auf S. 27 ist die Darstellung der Zahl 15 in binärer Schreibweise falsch: Statt 1111 = 23 + 22 + 21 + 20 muss es heißen: $1111 = 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0$. Analog sollte bei Punkt 5 statt 22 vielmehr 2^2 stehen. Beim Beispiel 25 sind die Exponenten ebenfalls heruntergerutscht (tatsächlich ist $25 = 2^4 + 2^3 + 1$). Wir danken unseren Lesern für die Hinweise.

Der ewige Sturm

Eine isländische Exklave überdauert das Ende der Zivilisation

Eine Kurzgeschichte von Thomas Grüter

Ich war 14, als ich meinen Bruder an die Dämonen verlor. Zwei Jahre jünger als ich, war Jamie knapp größer. Und, was ich damals unverzeihlich fand, sehr viel mutiger. Ohne zu zögern, lief er auf einer schmalen Planke über einen schäumenden Wildbach oder erklomm eine glitschige Felswand. So befanden wir ihn eines Tages für würdig, mit uns die verbotene lange Treppe zum Hochland hinaufzuklettern, ins Reich der heulenden Sturmdämonen.

In Hoddmímis Holt, der tiefen Schlucht, die unsere Heimat war, hörten wir sie dort oben brüllen, kreischen und toben. Sie rollten Steine herum und warfen sie voller Wut zu uns herunter. Sie verknoteten den Regen zu bizarren, weißen Tüchern, bevor sie ihn uns ins Gesicht bliesen. Tief unten in der Talsohle hatten sie keine Macht. Nur manchmal, wenn der Sturm von seinem üblichen Südwest auf Südost drehte, fegten sie das Holt entlang. Dann versteckten wir uns in unseren künstlichen Höhlen und warteten tagelang, bis sie wieder abzogen.

An jenem schrecklichen Tag im Sommer des Jahres 19 hetzten wir die 845 Stufen hinauf, in Richtung Hochland. Die Treppe ächzte und schwang in ihren Halterungen. Obwohl wir nicht wirklich glaubten, sie könne sich losreißen, liefen wir doch, so schnell wir konnten, zuerst auf leichten Füßen, dann mit zunehmend schweren Beinen, keuchend und verschwitzt.

Am oberen Ende der Treppe schloss sich der Felsentunnel an, der mit 42 in den Stein gehauenen Stufen auf die Ebene führte. Bevor wir in ihn hineingingen, hielten wir an, schwer atmend, und sahen in die Schlucht hinunter. Unter dem grauen Himmel strahlten die hell erleuchteten Treibhäuser wie grüne Edelsteine. Der Fluss tobte und schäumte in seinem geschwungenen Betonbett. Die grauen Doppeltore der riesigen, in die felsige Wand gesprengten Fahrzeughalle erschienen uns winzig.

Nach einer kleinen Atempause wandten wir uns um und betraten den Tunnel. Kurz vor dem Eingang hing immer noch die große Bronzetafel mit dem Gründungstext: »Internationale Forschungsgruppe in Hoddmímis Holt, Island. Gegründet im Jahr 0 der zwölf Familien, im Jahr 2085 CE, im Jahr 3 des Ewigen Sturms, im Jahr der Evakuierung der Insel Island. Wir danken dem isländischen Volk und der internationalen Gemeinschaft für ihre unschätzbare Hilfe beim Ausbau unseres Tals.« Darunter hatten die zwölf Familien stolz ihre Namen gesetzt und an den unteren Rand der Tafel den rätselhaften Satz eingraviert: »Der Große Rote Fleck ist auf die Erde gekommen.«

Je höher wir stiegen, desto lauter wurde das Tosen und Pfeifen. An der Tunnelmündung brüllte der Sturm so gewaltig, dass er uns jedes Wort vom Mund riss und wir uns nur mit Handzeichen verständigen konnten. Es brauchte Mut, den Tunnel zu verlassen.

An seinem Ausgang standen nur noch die Reste der aufgegebenen Wetterstation, von einer übermannshohen Mauer vor dem Sturm geschützt. Irgendwann hatten die Dämonen die Messgeräte umgeworfen, das Dach der Gerätehütte abgerissen, die Wände zerschlagen und die Mauer bis auf Brusthöhe abgetragen. Für die Rasmussenzwillinge und mich war das Gelände ein fantastischer Spielplatz voller Abenteuer und Gefahr.

Obwohl der Sturm innerhalb der Ruinen der Umfassungsmauer nicht seine volle Kraft entfaltete, hätte er uns sofort umgeworfen. Also krochen wir, wie Krabben an den Boden gedrückt, dorthin wo Sand und Wind eine schmale, zwei Handspannen über den Boden reichende Lücke in die Mauer gefräst hatte.

Dahinter lauerte eine graubraune, geröllübersäte Ebene. Über sie jagten Schatten und Schleier: die Sturmdämonen. Jetzt galt es, einen schnellen Blick in ihr grausiges Reich zu erhaschen und dann zurückzurobben, die Augen zugekniffen wegen der Sandkörner, die wie tausend spitze Nadeln in unser Gesicht peitschten.

Wir hatten diese Mutprobe im letzten Jahr abgelegt, aber Jamie war zum ersten Mal hier. Wir sahen gespannt zu, wie er hinauskroch. An der Mauerlücke angekommen, wartete er eine Atempause des Sturms ab und richtete sich tollkühn auf. Einen Moment stand er da, stolz und gerade, mit ausgebreiteten Armen, die Finger in die Steine am Rand der Mauerlücke gekrallt. Triumphierend sah er sich zu uns um. Dann packte ihn eine Böe und riss ihn davon.

Voller Schrecken kroch ich hinaus und spähte durch die Mauerlücke. Jamie lag 20 Meter entfernt verkrümmt und regungslos am Boden – so unerreichbar wie auf dem Mond. Dann frischte der Sturm noch einmal auf, die Dämonen ergriffen ihn erneut, warfen ihn herum und zogen ihn immer weiter in ihr Reich. Unser Spiel war vorbei, wir rannten hinunter, gefährlich schnell, und holten die Erwachsenen, doch auch sie konnten nicht helfen. Ich bettelte und weinte, aber jeder Rettungsversuch hätte nur weitere Menschen in Gefahr gebracht.

Niemand bestrafte uns, und das war das Schlimmste. Wir wollten Prügel beziehen, als Absolution für unsere Sünden, aber es geschah nichts. Der Rat ließ lediglich die Treppe sperren.

Meine Freundschaft mit den Rasmussenzwillingen zerbrach, wir unternahmen nichts mehr zusammen und sprachen lange Zeit nur noch das Nötigste. Aber in unserer

kleinen isolierten Gemeinschaft waren wir letztlich aufeinander angewiesen. Im Jahr meiner Geburt hatten die Satellitennetze aufgehört, unsere Signale zu beantworten, so dass wir vom Rest der Welt abgeschnitten waren. Mich hatte das nie gestört, ich kannte es nicht anders. Mir und den 20 anderen hier geborenen Kindern, den Holtern, erschienen die alten Filme und Bilder von windstillen Orten mit endlos vielen Menschen ganz und gar märchenhaft. Unsere Wirklichkeit war der ewige Sturm, und er war immer schon da gewesen.

»Blödsinn!«, erwiderte Eiður Grímsson, unser Lehrer, wenn einer von uns diesen Gedanken aussprach. Dann erzählte er uns, dass die Menschen die Erde immer mehr aufgeheizt hatten, bis sich die Luftströmungen verkeilten. Und wie schließlich ein riesiger Sturmwirbel zwischen Island und Grönland stecken geblieben war. Er wuchs stetig an und sprengte bald die Skala der Windstärken. Und er blieb, über Monate und Jahre. Nach zwei Jahren beschloss das Althing die Räumung Islands.

»Heldenhaft, wie wir waren«, fuhr Grímsson mit übertriebenem Pathos fort, »blieben wir zurück, um den ewigen Sturm zu studieren. Und jetzt sitzen wir hier fest.« Wir Holter empfanden das nicht so. Uns erschien die Außenwelt so mythisch wie Asgard oder der Himmel. Und bald sollte sie endgültig verlöschen.

Es begann 18 Monate nach Jamies Tod. Mein Vater und ich überprüften die Generatoren an der unteren Staumauer, die das Holt gegen die Küstenebene abschloss. Er war der Ingenieur der Gemeinschaft, ich würde sein Amt irgendwann übernehmen.

Viele Jahre lang ließen die Sturmdämonen niemanden mehr an uns heran

Plötzlich schrillte ein Alarmton durch die Generatorenhalle. Die Monitore im Kontrollraum meldeten gefährlich ansteigende Radioaktivität an den Filtern der Belüftungsanlage.

Mein Vater rief die Filterdiagramme aller Gebäude auf und starrte erschrocken auf die rot hinterlegten Werte. Die KI wies uns darauf hin, dass die Gefahr von außen kam. Mein Vater entschied, dass alle sofort die Schutzbunker aufsuchen sollten. Also strömte unsere Gemeinschaft in die ehemalige Militäranlage, zu der wir aus dem Holt Zugang hatten.

Die Fahrzeughalle und das Baustofflager waren so konstruiert, dass sie mehrere hundert Menschen vor Atomkriegen und Vulkanausbrüchen schützen konnten. Eigentlich liebten wir die regelmäßigen Alarmübungen und rissen unsere Witze darüber, so wie man im Spiel lachend »Wolf!« ruft. Aber jetzt stand er plötzlich vor uns, riesenhaft und grau.

Am ersten Tag hörte ich meine Mutter fragen, ob es vielleicht nur ein Unfall war. Ein explodiertes Kernkraftwerk, ein fehlgeschlagener Atomwaffentest. Doch mein Vater wollte nichts davon hören. Die Signatur des Fallouts deute auf Bomben hin, und bei der Stärke der Strahlung müssten hunderte explodiert sein, antwortete er. Meine Mutter begann zu weinen.

Wir nannten diese Zeit »Ragnarök«, die Dämmerung der Götter und der Menschen. Draußen wurde es ungewohnt kalt, der ewige Sturm ließ deutlich nach, und manchmal regnete es bis zu zehn Tage hintereinander überhaupt nicht. Dann, nach bangen Wochen, frischte der Sturm wieder auf.

Der gewohnte tägliche Regen kehrte zurück und wusch den strahlenden Staub in den Fluss. Mein Vater hatte das untere Staubecken leerlaufen lassen, damit die radioaktiven Partikel sich nicht mit dem Schlamm im See absetzen konnten, sondern gleich ins Meer flossen. Erst nach mehr als zwei Monaten durften wir in unsere Häuser zurück.

Für uns Holter hatte sich nichts verändert, für die Älteren alles. Und dann fanden wir den toten Mann. Als wir den unteren Stausee wieder fluten wollten, lag er zerschmettert am Fuß der Mauer. Er hätte nicht hier sein dürfen, und dennoch lag er da, und schlimmer noch, er trug Waffen. Ein Gewehr, ein Messer, vier Handgranaten. Sein grüner Tarnanzug und der Inhalt seines Rucksacks verrieten uns nicht, woher er gekommen war.

Mehrere Monate lang stellten wir Wachen an die Staumauer. Doch die Sturmdämonen, unsere verlässlichen Kerkermeister, ließen niemanden mehr an uns heran, 16 Jahre lang, bis gestern – als plötzlich das vertraute Heulen des ewigen Sturms abschwoll und verstummte. Als wir erstaunt hinausgingen, leuchtete der sonst grau gefleckte Himmel in einem unirdischen Blau, und ein gleißendes gelbes Auge verströmte Wärme und Licht. Zum ersten Mal seit Jamies Verschwinden fühlte ich den Drang, zu beten.

Die Dämonen sind gegangen. Unsere Kerkertür steht offen. Wir könnten einfach bleiben und warten, ob die Welt zu uns kommt. Doch die Versammlung hat anders entschieden. Eine Expedition wird nach Reykjavik fahren. Vielleicht ist dort jemand zurückgeblieben. Die Versammlung hat mir die Ehre übertragen, eines der schweren Raupenfahrzeuge durch die weglose Öde zu steuern. Ich habe Angst davor, und ich könnte ablehnen. Aber dann denke ich an Jamie, der den Mut gehabt hat, aufrecht gegen den Sturm zu kämpfen.

Wir fahren morgen beim ersten Licht. ◂

DER AUTOR

Thomas Grüter ist Mediziner und verfasst wissenschaftliche sowie populärwissenschaftliche Artikel und Bücher. Er lebt und arbeitet in Münster.

VORSCHAU



HENRIK5000 / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SYNTHETISCHE ORGANISMEN

Die Vorstellung, Leben von Grund auf neu zu erschaffen, fasziniert Menschen seit Langem. Um das Ziel zu erreichen, fügen Forscher Biomoleküle wie Lipide und Proteine zu Strukturen zusammen, die dann Eigenschaften ähnlich denen lebender Zellen aufweisen. Auf diese Weise gelingt es ihnen bereits, Gebilde zu erzeugen, die einige Schritte der Fotosynthese nachvollziehen. Das Fernziel ist eine rein synthetische Zelle, die wachsen, sich teilen und evolvieren kann.


PETERETCHELLS / GETTY IMAGES / ISTOCK

DAS KOMPLEXE INNENLEBEN DER DELFINE

Delfine gelten nicht nur als intelligent, sie zeigen auch Charakter. So unterscheiden sie sich individuell in ihren psychologischen Persönlichkeitsprofilen oder in ihrer Neigung zum Optimismus.


ALEKSANDARGEORGIEV / GETTY IMAGES / ISTOCK

WINDWECHSEL

In der Stratosphäre wehen heftige Winde, die alle 14 Monate ihre Richtung wechseln. Forscher versuchen dieses Phänomen besser zu verstehen, um seine Auswirkungen auf das Klima vorherzusagen – vor allem dann, wenn der regelmäßige Umschwung wie im Jahr 2016 unerwartet aussetzt.


NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE (STSCI/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION

GIBT ES DIE DUNKLE MATERIE ÜBERHAUPT?

Falls die hypothetischen Teilchen nicht existieren, funktioniert die Gravitation auf galaktischen Skalen anders als gedacht. Solche Ideen spielten in den Theorien bisher nur eine Nebenrolle – vielleicht zu Unrecht.